

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

**Problematika zkratových proudů v trojfázových
střídavých soustavách**

Short Circuits in Three-phase AC Networks

Obsah

Obsah.....	1
Úvod	2
Teoretický rozbor zkratových jevů.....	2
Druhy zkratů	2
Příčiny vzniku zkratu.....	3
Následky zkratů	5
Omezení zkratových proudů.....	6
Omezení účinků zkratových proudů.....	7
Metodika výpočtu zkratových proudů podle ČSN EN 60909	8
Definice	8
Průběh zkratového proudu.....	9
Předpoklady výpočtu	11
Ekvivalentní napěťový zdroj v místě zkratu.....	11
Použití souměrných složek	12
Parametry prvků soustavy - zkratové impedance	13
Síťové napáječe	14
Transformátory	15
Korekční součinitelé pro impedance síťových transformátorů	15
Venkovní vedení a kabely	15
Reaktory omezující zkratový proud	16
Synchronní stroje.....	16
Elektrárenský blok.....	17
Asynchronní motory	18
Příspěvek zkratových proudů od asynchronních motorů	18
Výpočet zkratových proudů	19
Počáteční souměrný rázový zkratový proud I_k''	19
Nárazový zkratový proud i_p	20
Souměrný vypínací zkratový proud I_b	21
Ustálený zkratový proud I_k	22
Ekvivalentní oteplovací zkratový proud I_{th}	24
Příklad výpočtu zkratových proudů.....	25
Závěr.....	40
Použitá literatura.....	40

Úvod

Zkratky jsou nejrozšířenějšími poruchami v elektrizační soustavě. Zkrat vznikne poruchovým spojením fází navzájem, nebo spojením fáze se zemí v soustavě s uzemněným uzlem. Tím dochází ke vzniku nežádoucích zkratových proudů, které jsou nadměrně vysoké oproti normálním provozním proudům. Elektrická zařízení musí být navržena tak, aby odolala všem druhům zkratů a nepříznivým účinkům zkratových proudů. Abychom mohli elektrická zařízení správně dimenzovat, musíme umět stanovit velikost zkratových proudů.

Výpočtem zkratových proudů se zabývá norma ČSN EN 60909. Tato norma nahrazuje starší, dnes již neplatnou normu ČSN 33 3020. Zatímco ČSN 33 3020 připouští odlišné postupy pro výpočet zkratů, lišící se pracností a přesností výsledků, v ČSN EN 60909 je uveden jednotný postup, používající metodu ekvivalentního napětového zdroje v místě zkratu. ČSN EN 60909 nepracuje s časovými konstantami, ale pouze s poměrem R/X .

Teoretický rozbor zkratových jevů

Druhy zkratů

K chybnému spojení může dojít v trojfázové soustavě mezi různými vodiči. Mluvíme potom o těchto druzích zkratů:

Souměrný zkrat

Souměrný trojfázový zkrat – nastane při spojení všech tří fází navzájem v jednom místě. Všechny tři vodiče jsou shodně postiženy a vedou stejný zkratový proud. Tento typ zkratu se nejčastěji vyskytuje v kabelových sítích (protože oblouk vzniklý při jakémkoliv zkratu snadno poruší izolaci mezi všemi fázemi) a vede často k nejvyšším hodnotám *předpokládaného zkratového proudu*.

Všechny ostatní zkratky se nazývají nesouměrné:

Nesouměrné zkratky

Dvoufázový zkrat – vzniká při prostém spojení dvou různých fází v jednom místě

Dvoufázový zemní zkrat – vzniká, pokud jsou dvě spojené fáze současně spojeny se zemí

Jednofázový zkrat – vzniká při spojení jedné fáze se zemí u soustavy s uzemněným uzlem. Způsobuje největší rušení sdělovacích vedení.

Zkrat může nastat dokonalým nebo nedokonalým spojením fází:

Dokonalý zkrat

Nastává dokonalým spojením fází, při kterém je impedance v místě spojení zanedbatelná (např. zkrat způsobený kovovým předmětem).

Nedokonalý zkrat

Impedance zkratového spojení je značná a ovlivňuje velikost zkratového proudu. Může být způsoben např. spadlou větví, která má určitý odpor, nebo může jít o zkrat obloukový, kde elektrický oblouk má také určitý odpor.

přetížením těchto částí. Značný počet zkratů bývá způsoben i nedbalou montáží elektrických zařízení, hlavně pokud jde o uložení vodičů (otlačená izolace na ostrých hranách, neodborná spojení vodičů a jejich připojení na svorky strojů a přístrojů a neodborné provedení kabelových koncovek). Uvedené nedostatky a vady se mohou projevit až po delším provozu zařízení, kdy vlivem proudového zatížení a hlavně přetížení dochází k uvolnění spojů, jejich nadměrnému zahřívání, přetavení, vzniku elektrického oblouku, ionizaci okolního prostředí a k mezifázovému zkratu. Vady izolace se při normálním jmenovitém napětí obvykle neprojeví, k poruše dojde obvykle až při přepětí v síti.

Ad b) nedostatečná vzdušná doskoková vzdálenost

Zkratý zaviněné nedostatečnou vzdušnou doskokovou vzdáleností mezi živými částmi různého potenciálu nejsou časté. U rozveden se dodržují vzdušné vzdálenosti stanovené normou. U rozvaděčů jsou předepsány zkoušky zkušebním napětím. Nastane-li však vlivem dynamických sil při zkratu nebo jiným zásahem přiblížení vodičů pod předepsané vzdálenosti, je nutno počítat s tím, že vlivem přepětí (mnohdy už i provozního napětí) může dojít k přeskokům a ke zkratům.

Ad c) poškození cizími zásahy a povětrnostními vlivy

Toto je nejčastější příčina vzniku zkratů. Projevuje se především u kabelových rozvodů v zemi při výkopech, úpravách terénu, vozovek, při různých stavebních pracích, kdy jsou kabely poškozovány bagry, buldozery a podobně. Méně často bývají kabely poškozeny při vrtání děr, zarážení sond, pilotů, značkovacích a uzemňovacích tyčí, při přejíždění těžkých vozidel v místech uložení vodičů, působením tepla v křížovatkách s teplovody, vlivem koroze (bludnými proudy, chemickým působením půdy). V kabelových kanálech a prostorech nutno počítat s poškozením izolace vodičů hlodavci.

Na venkovních vedeních dochází častěji k poškození povětrnostními a přírodními vlivy – pádem stromů a větví, dotykem větví vedení při větru, ptactvem a podobně. Bývají však také často přechodného rázu. Přeruší-li se oblouk, který při poruše nastal, je vedení opět bez poruchy.

Ad d) chybná manipulace

K chybné manipulaci dochází nejčastěji u odpojovačů. Odpojovači lze odepínat jen určité malé proudy. Vypínají-li se větší proudy, vznikne mezi kontakty odpojovače oblouk, který ionizuje prostředí mezi póly odpojovače a po několika milisekundách dochází k trojfázovému zkratu. Tímto způsobem vznikají nejčastější úrazy pracovníků v elektrických rozvodných zařízeních.

Ad f) přepětí

Přepětí patří mezi nejčastější příčiny zkratů. Přepětí způsobuje zkraty hlavně v zařízeních s nedostatečnou izolací a s nedostatečnými vzdušnými doskokovými vzdálenostmi nebo v prostorech se ztíženými klimatickými podmínkami (nadmořská výška nad 1000 m, kondenzace par při poklesu teploty apod.). Přepětí jsou buď atmosférická (vnější) nebo provozní (vnitřní).

Atmosférická přepětí – vznikají ve venkovních vedeních elektrostatickou indukcí při výbojích mimo vedení nebo přímým úderem blesku do vedení. Proti atmosférickým přepětím se bránímebleskojistkami.

Provozní přepětí – vznikají při:

poruchových stavech – při zemních spojeních a při zkratech

při spínacích pochodech – při vypínání malých induktivních proudů (vypínání transformátorů naprázdno, motorů s kotvou nakrátko, reaktorů nebo kompenzačních tlumivek), při vypínání kondenzátorů a dlouhých vedení naprázdno.

při náhlé ztrátě zatížení – při vypnutí převážné části, nebo celé zátěže

při nesouměrných stavech – při nesouměrných poruchách za alternátory s vyniklými póly bez tlumicího vedení (při dvoufázových zkratech nebo při jednopólových a dvoupólových zemních spojeních).

Následky zkratů [2, str. 27-34]

Účinky zkratových proudů jsou:

- a) dynamické
- b) tepelné
- c) elektrický oblouk
- d) přepětí
- e) indukovaná napětí
- f) pokles napětí ve zkratovém obvodu
- g) ohrožení stability přenosů elektrické energie

Ad a) dynamické síly

Dynamické síly vznikají elektromagnetickým působením proudů v sousedních vodičích a jsou jim přímo úměrné. Největší silový ráz je způsoben první amplitudou zkratového proudu tzn. *nárazovým zkratovým proudem* i_p . Dosahuje takových hodnot, že může vážně ohrozit elektrická zařízení, pokud nejsou dimenzována tak, že těmto silám bezpečně odolávají.

Dynamické síly namáhají vodiče na ohyb, působí na podpěrky a průchodky, namáhají vinutí a jejich upevnění (čela vinutí a póly alternátorů, vinutí transformátorů, měřicích přístrojů, reaktorů a tlumivek), kabelové armatury a všechny přístroje, které leží ve zkratovém obvodu. U venkovních vedení (především vvn) způsobují tyto síly výkyvy vodičů, kterými se může vzdušná vzdálenost mezi vodiči zmenšit natolik, že dochází k přeskokům. Ohybem vodičů (např. přípojnic při zkratu na vývodu) může dojít k deformaci vodičů (často trvalé) a jejich vzájemnému dotyku nebo přiblížení natolik, že nastane nový zkrat. Nedostatečně dimenzované podpěrky holých vedení, odpojovačů a jiných přístrojů se vlivem sil ulámou, trhají se vinutí strojů a přístrojů. Dynamické síly mohou také vytrhnout nože odpojovače z kontaktů a vyvolat tak nový obloukový zkrat.

Ad b) tepelné účinky

Průchodem zkratového proudu zkratovým obvodem nastává nadměrné oteplení všech částí zkratového obvodu. Během krátké doby trvání zkratu nemůže být vzniklé teplo odvedeno do okolního prostředí a způsobuje velké oteplení. Nastává předčasné stárnutí izolace vodičů, strojů a přístrojů, dochází k vytavení nedokonalých spojů, popraskání podperek a průchodek teplem, spálení vinutí strojů a přístrojů, ke spékání kontaktů spínacích přístrojů, hlavně odpojovačů. Vlastní vodiče ztrácejí své mechanické vlastnosti nadměrným zahřátím. Může dojít taky k sublimaci izolace – vznikají výbušné plyny a pokud dojde k rozstříkování rozpáleného kovu nebo elektrickému oblouku, směs plynů a vzduchu může explodovat.

Ad c) elektrický oblouk

Účinky elektrického oblouku jsou způsobeny především jeho zářením a tlakem, vyvolaným energií oblouku a tepelným a světelným zářením. Záření vydávané elektrickým obloukem je ultrafialové, viditelné, infračervené a tepelné.

Teplota elektrického oblouku dosahuje v patách oblouku 2 000 až 4 000 °C. Maximální tlak vznikne nejpozději za 10 až 15 ms po zapálení oblouku. Vlivem těchto teplot dochází k tavení materiálu elektrod, k jeho zplyňování a rozstříkování vlivem vzniklého tlaku. U všech keramických

částí dochází k tavení, zplyňování a praskání keramiky popř. ustřížení vlivem současného působení dynamických sil. Izolace vodičů i vnitřní povlaky instalačních trubek uhelnatí.

Kromě záření působí při elektrickém oblouku horké plyny a kovové páry, které se prudce ohřívají a rozpínají. Rovněž rozstříknutý kov, porcelán a střeptiny se rychle šíří a ohrožují obsluhu. Styk obsluhujících pracovníků s horkými plyny a parami má za následek popáleniny. Záření způsobuje silné oslnění, poškození tkáně, zapálení oděvu, nervové šoky apod.

Ad d) přepětí

Přepětí je nebezpečné zejména při vypínání zkratů. Nebezpečí nevzniká velikostí přepětí (zotaveného napětí) ale jeho strmostí. Je-li strmost zotaveného napětí větší než je rychlost zotavující se elektrické pevnosti vypínací dráhy příslušného vypínače, dochází k opětovnému zapálení oblouku ve vypínači a tím k přerušení vypínacího procesu, popř. havárii vypínače.

Ad e) indukovaná napětí

Zkratové proudy se projevují indukčními účinky na sousední vedení indukovaným napětím. Jsou to zejména vedení slaboproudá, sdělovací, signální a jističí. Podél těchto vedení se mohou indukovat značná napětí, zejména pokud se zkratový proud vrací zpět zemí. Indukovaná napětí ohrožují funkci zařízení a bezpečnost osob při práci na zařízení.

Ad f) pokles napětí ve zkratovém obvodu

Pokles napětí je způsobený úbytky napětí, které jsou vyvolány zkratovým proudem na impedancích prvků sítě. Pokles napětí má vliv na spotřebiče připojené na rozvod mezi zdrojem proudu a místem zkratu. Tento vliv je různý pro různé druhy spotřebičů.

U žárových světelných zdrojů dochází při poklesu napětí ke zmenšení světelného toku. Výbojkové světelné zdroje zhasnou, poklesne-li zbytkové napětí pod hodnotu zážehového napětí světelného zdroje. U obloukových pecí uhasne elektrický oblouk, klesne-li napětí oblouku pod hodnotu potřebnou k udržení oblouku. U motorů se mění točivý moment, klesne-li napětí pod určitou mez, motor se může zastavit. Zastavením motorů vznikají značné ztráty, protože se přeruší výrobní proces. Problémy mohou nastat když se po vypnutí zkratu vrátí na svorky motorů původní napětí – všechny motory se budou rozbíhat současně a odebírat značné záběrové proudy.

Ad g) ohrožení stability přenosů elektrické energie

Zkrat má nepříznivý vliv na stabilitu chodu alternátorů, elektráren a rozvodných soustav jednak tím, že představují náhlou změnu zatížení, a jednak proto že způsobují pokles napětí na svorkách alternátorů. Při zkratu se zmenší činný výkon alternátoru, hnací stroj urychluje magnetové kolo a není-li zkrat včas odpojen, způsobuje kývání alternátorů, popř. porušení dynamické stability alternátorů, elektráren nebo celých soustav. Podle statistik je krajní napětí, pod nímž alternátory vypadnou ze synchronního chodu, 70 % svorkového napětí. Aby k tomu při zkratu nedocházelo, je nutné v co nejkratší době účinně zvýšit napětí na svorkách pomocí rychloregulátorů (za předpokladu dostatečného výkonu budiče).

Omezení zkratových proudů

Zkratové proudy lze omezit buď zmenšením výkonu zdrojů pracujících do zkratu nebo zvětšením výsledné impedance zkratového obvodu. [3, str. 83]

a) rozdělení zdrojů na samostatné úseky přípojníc

Omezením výkonu zdrojů elektrické energie nemíníme jen prosté použití zdrojů menšího

výkonu (protože bychom nezajistili potřebnou dodávku energie), ale především rozdělení zdrojů na samostatné úseky přípojníc, tak aby nepracovaly paralelně. Jedná-li se pouze o jeden zdroj (např. transformátor) o příliš velkém výkonu, nahradíme jej menšími zdroji, které pracují samostatně do oddělených úseků přípojníc. [3, str. 83]

b) zvětšení impedance zkratového obvodu

Buď se ve zkratovém obvodu použijí prvky s větší impedancí, nebo se do zkratového obvodu vloží další prvky s velkou impedancí. V úvahu připadá použití alternátorů s větší rázovou impedancí, použití transformátorů s vyšším napětím nakrátko, spojení transformátorů do bloku s alternátory a použití holých tyčových vedení namísto kabelových vedení (reaktance tyčových vedení je asi dvojnásobná než reaktance kabelů).

Nejúčinnější je použít reaktory. Jsou to uměle vytvořené indukční odpory bez železného jádra, zařazované do zkratového obvodu k omezení zkratových proudů. Nevýhodou je, že podstatně zdražují rozvodné zařízení. [3, str. 84-85]

Omezení účinků zkratových proudů

Aby nedocházelo k nadměrnému předimenzování elektrických zařízení, musíme si uvědomit všechny prostředky, jimiž lze omezit účinky zkratových proudů a které lze při návrhu zařízení využít.

a) omezení silových účinků

U tuhých vodičů (kabelová vedení se na dynamické účinky zkratových proudů nekontrolují) můžeme vhodným prostorovým uspořádáním dosáhnout zvětšení jejich odolnosti vůči silám při zkratu, aniž by bylo třeba je nadměrně dimenzovat. [2, str. 178]

Můžeme toho dosáhnout buď zmenšením volné délky tuhého vedení mezi dvěma podpěrkami, nebo zvětšením vzdálenosti vodičů jednotlivých fází (tato možnost je častější), nebo zvětšením průřezového modulu (u obdélníkových vodičů zvětšíme průřezový modul tím, že je uložíme naplocho místo svisle). [3, str. 81]

b) omezení tepelných účinků

Proudové dráhy ve zkratovém obvodu se musí dimenzovat natolik, aby se předpokládaným zkratovým proudem nezahřály nad dovolenou mez.

Tepelné namáhání a tím i minimální průřez vodiče je možno zmenšit omezením ekvivalentního oteplovacího proudu, zmenšením doby trvání zkratu, popř. i menším zatížením vodičů před zkratem. Nejúčinnějšího zmenšení tepelného namáhání lze dosáhnout vypnutím zkratu pojistkami. [2, str. 182]

c) omezení účinků elektrického oblouku

Proti účinkům elektrického oblouku musíme chránit jak vlastní rozvodné zařízení, tak i obsluhující pracovníky. Především se musíme zaměřit na bezpečnost pracovníků a omezit možnost úrazu. Možná jsou tato opatření: omezit zkratové proudy, zakrýt rozvodné zařízení, dálkově ovládat rozvodné zařízení nebo rychle odepnout zkrat.

Vhodným zakrytím zařízení lze uchránit pracovníky před zářením, horkými plyny a stříkajícím kovem. Provádějí se různé stupně zakrytí. K elektrickému oblouku dochází nejčastěji při manipulaci s odpojovači, tj. při jejich vypínání pod zatížením. Je proto účelné zaměřit se hlavně na zakrytí prostoru odpojovačů a výsuvných kontaktů.

Nejvhodnější způsob ochrany obsluhujícího pracovníka je dálkové ovládání. Namísto manipulace přímo na zařízení se ovládání řídí buď z dozorny, nebo z chráněného místa v prostoru rozvodného zařízení. [3, str. 82]

Metodika výpočtu zkratových proudů podle ČSN EN 60909

Definice [1, str. 11-13]

Zkrat: náhodné nebo úmyslné vodivé spojení mezi dvěma nebo více vodivými částmi vedoucí k tomu, že rozdíl elektrických potenciálů mezi těmito vodivými částmi je roven nule nebo má hodnotu blízkou nule.]

Zkratový proud: proud, který teče místem zkratu po dobu trvání zkratu. Je to nadproud v důsledku zkratu v elektrické soustavě.

Předpokládaný zkratový proud: proud, který by protékal obvodem, kdyby byl zkrat nahrazen ideálním spojením se zanedbatelnou impedancí beze změny napájení.

Souměrný zkratový proud: efektivní hodnota střídavé souměrné složky předpokládaného zkratového proudu se zanedbatelnou eventuální aperiodickou složkou proudu.

Počáteční souměrný rázový zkratový proud I_k'' : efektivní hodnota střídavé souměrné složky předpokládaného zkratového proudu v okamžiku vzniku zkratu, při konstantní impedanci.

Počáteční souměrný rázový zkratový výkon S_k'' : pomyslná hodnota definovaná jako součin počátečního souměrného rázového zkratového proudu I_k'' , jmenovitého napětí sítě U_n , a součinitele $\sqrt{3}$. Pak tedy $S_k'' = \sqrt{3} \cdot U_n I_k''$

Střední (aperiodická) složka $i_{d.c.}$ zkratového proudu: střední hodnota horní a dolní obalové křivky průběhu zkratového proudu klesající ze své počáteční hodnoty k nule.

Nárazový zkratový proud i_p : maximální možná okamžitá hodnota předpokládaného zkratového proudu

Souměrný zkratový vypínací proud I_b : efektivní hodnota úplné periody souměrné složky předpokládaného zkratového proudu v okamžiku oddělení kontaktů prvního pólu spínacího zařízení

Ustálený zkratový proud I_k : efektivní hodnota zkratového proudu, který zůstává po odeznění přechodného jevu

Ekvivalentní oteplovací zkratový proud I_{th} : efektivní hodnota proudu, který má stejné tepelné účinky a stejnou dobu trvání jako skutečný zkratový proud, který může obsahovat stejnosměrnou složku a s časem se mění

Jmenovité napětí sítě U_n : sdružené napětí, kterým je síť označena a k němuž se vztahují provozní charakteristiky.

Napětí ekvivalentního zdroje $cU_n/\sqrt{3}$: napětí ideálního zdroje přiložené v místě zkratu v sousledné složkové soustavě pro výpočet zkratového proudu. Jedná se o jediné aktivní napětí sítě.

Napěťový součinitel c : poměr mezi napětím ekvivalentního napěťového zdroje a jmenovitým napětím sítě U_n děleným $\sqrt{3}$. Hodnoty jsou uvedeny v tabulce 1.

Elektricky vzdálený zkrat: zkrat, při kterém velikost souměrné složky předpokládaného zkratového proudu zůstává v podstatě konstantní.

Elektricky blízký zkrat: zkrat, při kterém příspěvek alespoň jednoho synchronního stroje k předpokládanému počátečnímu souměrnému rázovému zkratovému proudu překračuje

dvojnásobek jmenovitého proudu stroje, nebo zkrat, při kterém příspěvek asynchronních motorů překračuje 5 % počátečního souměrného rázového zkratového proudu I_k'' bez motorů.

Rázová reaktance X_d'' synchronního stroje: reaktance uplatňující se v okamžiku zkratu; pro výpočet zkratových proudů se používá nasycená hodnota X_d'' . Jestliže reaktanci X_d'' dělíme jmenovitou impedancí $Z_{rG} = U_{rG}^2 / S_{rG}$ dostaneme výsledek v poměrných jednotkách, který se označuje malým písmenem $x_d'' = X_d'' / Z_{rG}$.

Průběh zkratového proudu

Při každém zkratu, bez ohledu na jeho příčinu, se jedná o přechod z normálního stavu na stav poruchový, tj. přechod z normálního proudu na ustálený zkratový proud. Tento přechod se neděje skokem v jediném okamžiku, ale je doprovázen přechodným dějem, který trvá určitou dobu. Výsledný zkratový proud se skládá ze dvou hlavních složek: [2, str. 13-15]

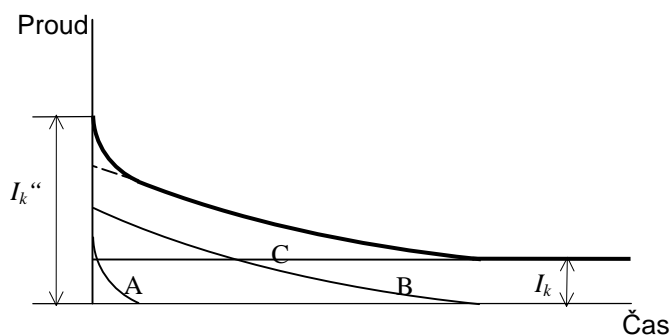
1) Stejnoseměrná složka

Zkratový proud se stejnosměrnou složkou nazýváme nesouměrný zkratový proud. Počáteční velikost stejnosměrné složky závisí na okamžiku, ve kterém nastal zkrat. Zkratový proud bývá převážně indukčního charakteru, to znamená že je za napětím opožděn asi o 90° . Stejnoseměrná složka je tedy maximální tehdy, je-li okamžitá hodnota napětí v okamžiku zkratu nejmenší. V případě trojfázového zkratu jsou stejnosměrné složky v jednotlivých fázích různé, díky posunutí fázových napětí o 120° . Maximální stejnosměrná složka může být jen v jedné fázi.

2) Střídavá složka

Střídavá složka kmitá průmyslovým kmitočtem s postupně klesající amplitudou a je souměrná podle osy času, nazývá se podle toho *souměrný zkratový proud* (viz definice). Má stejný průběh jako zkratový proud ve fázi, kde nevzniká stejnosměrná složka.

Střídavá složka zkratového proudu (souměrný zkratový proud) se obecně skládá ze tří složek. Všechny tři složky mají sinusový průběh o kmitočtu soustavy. Složky A a B mají tendenci exponenciálně klesat, složka C zůstává po celou dobu trvání zkratu neměnná. Na Obr. 2. jsou vyznačeny složky, které tvoří průběh efektivní hodnoty *souměrného zkratového proudu*.



Obr. 2. – efektivní hodnota souměrného zkratového proudu

A – rázová složka zkratového proudu

B – přechodná složka zkratového proudu

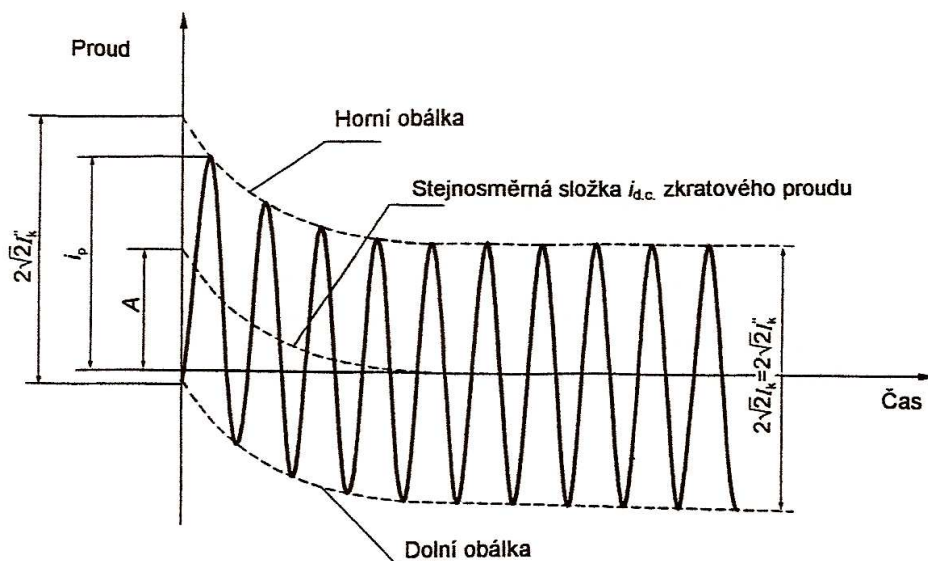
C – ustálená složka zkratového proudu

I_k'' – počáteční souměrný rázový zkratový proud

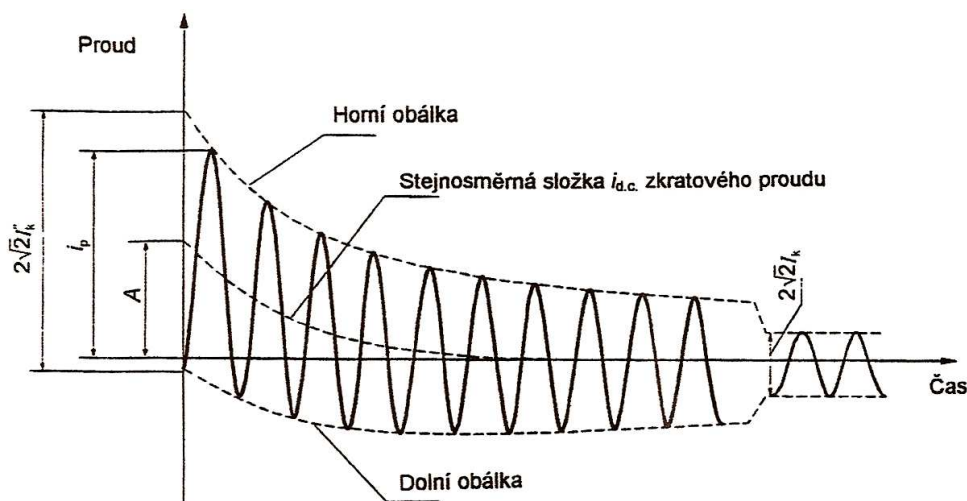
I_k – ustálený zkratový proud

U elektricky vzdáleného zkratu zůstává střídavá složka konstantní – Obr. 3.

U elektricky blízkého zkratu střídavá složka klesá – Obr. 4.



Obr. 3. – zkratový proud elektricky vzdáleného zkratu s konstantní střídavou složkou



Obr. 4. – zkratový proud elektricky blízkého zkratu s klesající střídavou složkou

I_k'' – počáteční souměrný rázový zkratový proud

i_p – nárazový zkratový proud

I_k – ustálený zkratový proud

$i_{d.c.}$ – stejnosměrná složka zkratového proudu

A – počáteční hodnota stejnosměrné složky $i_{d.c.}$

Kompletní výpočet zkratových proudů určuje proudy jako funkce času v místě zkratu od počátku zkratu až do jeho konce. Zkratové proudy odpovídají okamžité hodnotě napětí na počátku zkratu (viz Obr. 3 a Obr. 4.) Ve většině praktických případů takový výpočet není nutný. Podle použití výsledků nás zajímá efektivní hodnota souměrné střídavé složky (počáteční souměrný rázový zkratový proud I_k'') a nárazový zkratový proud i_p . [1, str. 18]

Předpoklady výpočtu [1, str. 19]

Výpočet maximálních a minimálních zkratových proudů vychází z následujících zjednodušení:

- Po dobu trvání zkratového proudu se nemění typ zkratu, tj. trojfázový zkrat zůstává trojfázovým a zkrat mezi fází a zemí zůstává po celou dobu zkratu zkratem mezi fází a zemí.
- Po dobu zkratu nedochází k žádné změně v síti.
- Uvažují se impedance transformátorů pro přepínače odboček v základní poloze.
- Odpory oblouku se neuvažují.
- Všechny kapacity vedení a paralelní admitance a netočivé statické zátěže jsou zanetbány vyjma paralelních admitancí v netočivé soustavě.

Pokud se počítají zkratové proudy v soustavách s rozdílnými hladinami napětí, je nutné přepočítat hodnoty impedancí z jedné napěťové hladiny na jinou – obvykle na tu napěťovou hladinu, ve které se má určit zkratový proud.

Ekvivalentní napěťový zdroj v místě zkratu [1, str. 20]

Metoda použitá pro výpočet je založena na zavedení ekvivalentního napěťového zdroje v místě zkratu. Ekvivalentní napěťový zdroj je jediným aktivním napětím soustavy. Všechny síťové napáječe, synchronní a asynchronní stroje jsou nahrazovány svou vnitřní impedancí.

Ve všech případech se k určení zkratového proudu v místě zkratu F použije ekvivalentní napěťový zdroj. Provozní údaje o odběrech, o poloze přepínače odboček transformátorů, buzení generátorů atd. jsou postradatelné; odpadá nutnost provádět výpočty toku výkonů v různých stavech před zkratem.

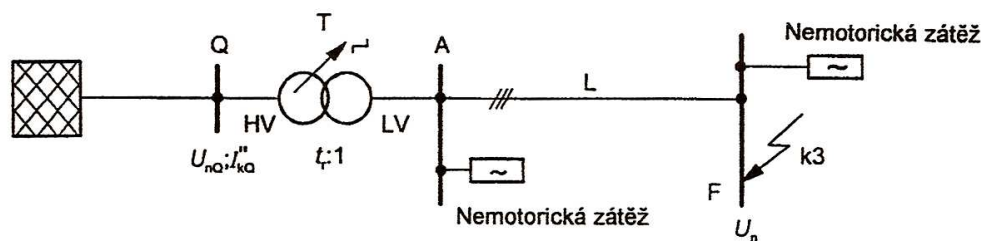
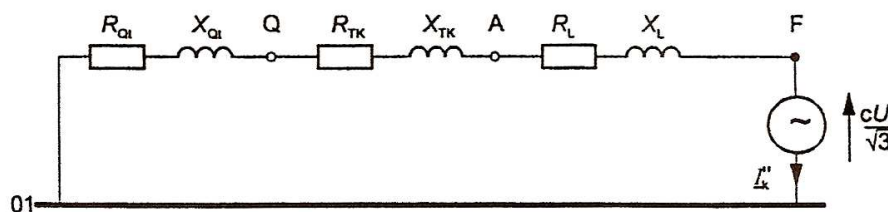


Schéma soustavy



Náhradní schéma obvodu sousledné složky soustavy

Obr. 5. – příklad ekvivalentního napěťového zdroje v místě zkratu

Tabulka 1. – napět'ový součinitel c pro výpočet napětí ekvivalentního napět'ového zdroje

Jmenovité napětí U_n	Napět'ový součinitel c pro výpočet	
	maximálních zkratových proudů c_{max} ¹⁾	minimálních zkratových proudů c_{min}
Nízké napětí 100 V až 1000 V	1,05 ³⁾ 1,10 ⁴⁾	0,95
Vysoké napětí >1 kV až 35 kV	1,10	1,00
Velmi vysoké napětí ²⁾ >35 kV		

¹⁾ $c_{max}U_n$ by neměl překročit nejvyšší napětí U_m pro zařízení energetických soustav

²⁾ Pokud není jmenovité napětí definováno potom $c_{max}U_n=U_m$ nebo $c_{min}U_n=0,9U_m$

³⁾ Pro soustavy nízkého napětí s tolerancí +6 %, například pro soustavy přecházející z 380 na 400 V

⁴⁾ Pro soustavy nízkého napětí s tolerancí +10 %.

Použití souměrných složek [1, str. 22-24]

Výpočet hodnot proudů v trojfázových střídavých soustavách při souměrných a nesouměrných zkratech se zjednoduší použitím souměrných složek. Předpokládá se přitom, že elektrické zařízení má symetrickou strukturu, například v případě transponovaných venkovních vedení. Výsledky výpočtu jsou dostatečně přesné i v případě netransponovaných venkovních vedení.

Při použití této metody se zjistí proudy v každé fázi superponováním tří souměrných složkových soustav:

- proud souměrné složkové soustavy $\underline{I}_{(1)}$
- proud zpětné složkové soustavy $\underline{I}_{(2)}$
- proud netočivé složkové soustavy $\underline{I}_{(0)}$

pokud budeme fázi L1 považovat za referenční, potom jsou proudy \underline{I}_{L1} , \underline{I}_{L2} a \underline{I}_{L3} :

$$\underline{I}_{L1} = \underline{I}_{(1)} + \underline{I}_{(2)} + \underline{I}_{(0)} \quad (1a)$$

$$\underline{I}_{L2} = a^2 \underline{I}_{(1)} + a \underline{I}_{(2)} + \underline{I}_{(0)} \quad (1b)$$

$$\underline{I}_{L3} = a \underline{I}_{(1)} + a^2 \underline{I}_{(2)} + \underline{I}_{(0)} \quad (1c)$$

$$\underline{a} = -\frac{1}{2} + j\frac{1}{2}\sqrt{3} \quad \underline{a}^2 = -\frac{1}{2} - j\frac{1}{2}\sqrt{3} \quad (2)$$

Každá z těchto tří souměrných složek má vlastní impedanci.

Sousledná zkratová impedance $\underline{Z}_{(1)}$ - určíme ji tak, že souměrnou soustavu napětí sousledné složky v kladném pořadí fází přiložíme do místa zkratu F, všechny synchronní a asynchronní stroje jsou nahrazeny jejich vnitřními impedancemi.

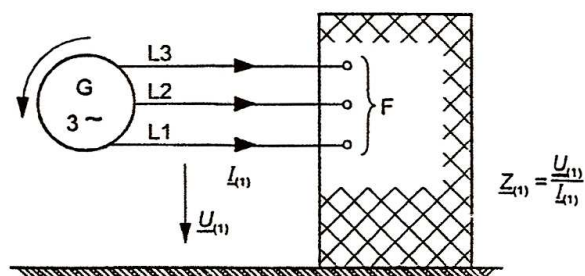
Zpětná zkratová impedance $\underline{Z}_{(2)}$ - určíme když souměrnou soustavu napětí zpětné složky v záporném pořadí fází přiložíme do místa zkratu F.

Netočivá zkratová impedance $\underline{Z}_{(0)}$ - určíme když přiložíme střídavé napětí mezi třemi zkratovanými fázemi a společným zpětným vedením (například zemnicí soustavou, nulovým vodičem, zemnicími vodiči, stíněním kabelu a pláštěm kabelu).

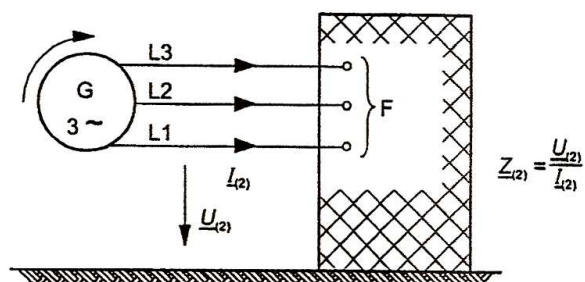
(viz Obr. 6.)

Hodnoty sousledných a zpětných impedancí se mohou obecně lišit pouze v případě točivých strojů. Pokud se počítají elektricky vzdálené zkraty, je obecně dovoleno uvažovat $\underline{Z}_{(2)} = \underline{Z}_{(1)}$.

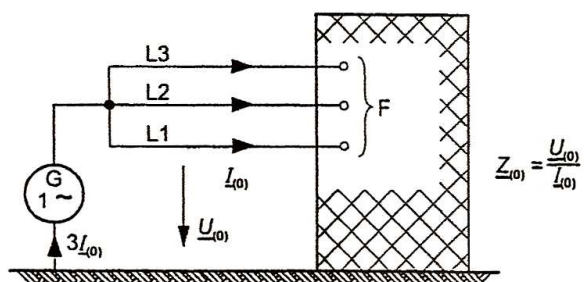
Kapacity vedení (venkovních vedení a kabelů) v soustavách nízkého napětí se mohou zanedbat pro sousledné, netočivé a zpětné soustavy. Zanedbání netočivé složky kapacit vedení v soustavách s uzemněným uzlem vede k výsledkům, které jsou mírně vyšší než skutečné hodnoty zkratových proudů.



Sousledná složka zkratové impedance $\underline{Z}_{(1)}$



Zpětná složka zkratové impedance $\underline{Z}_{(2)}$



Netočivá složka zkratové impedance $\underline{Z}_{(0)}$

Zkratové impedance trojfázového střídavého systému v místě zkratu F

Obr. 6. – zkratové impedance v místě zkratu F

Parametry prvků soustavy - zkratové impedance [1, str. 25-36]

U síťových napáječů, transformátorů, venkovních vedení, kabelů, reaktorů a podobného zařízení jsou si sousledná a zpětná zkratová impedance rovny $\underline{Z}_{(1)} = \underline{Z}_{(2)}$.

Netočivá zkratová impedance $\underline{Z}_0 = \underline{U}_{(0)} / \underline{I}_{(0)}$ se určuje ze střídavého napětí uvažovaného mezi třemi paralelními vodiči a společným zpětným vedením (například zemí, zemnicím zařízením,

nulovým vodičem, zemnicím vodičem, kabelovým pláštěm a kabelovým pancířem). V tomto případě protéká společným zpětným vedením trojnásobek proudu netočivé složky.

Impedance generátorů, síťových transformátorů a elektrárenských bloků se musí vynásobit impedančními korekčními součiniteli K_G , K_T a K_S nebo K_{SO} .

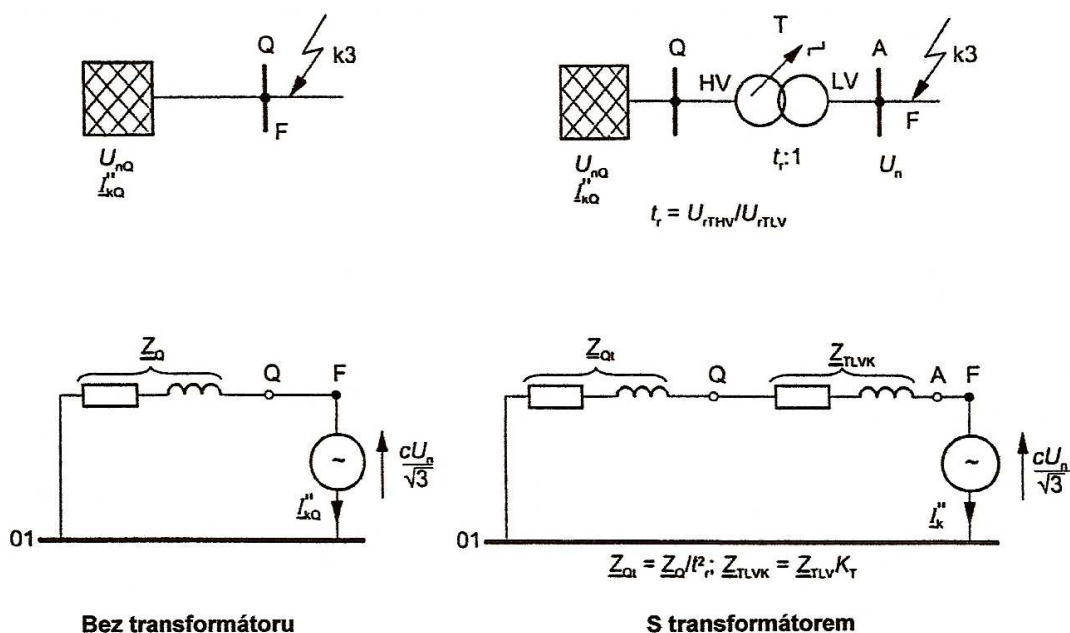
Síťové napáječe

Je-li trojfázový zkrat napájen ze sítě, u které je znám pouze počáteční souměrný rázový zkratový proud I''_{kQ} v bodě připojení napáječe Q pak ekvivalentní impedance Z_Q (sousedná zkratová impedance) sítě v bodě připojení napáječe Q se určuje následovně:

$$Z_Q = \frac{cU_{nQ}}{\sqrt{3} \cdot I''_{kQ}} \quad (3)$$

Pokud je znám R_Q/X_Q , pak X_Q se určí následovně:

$$X_Q = \frac{Z_Q}{\sqrt{1 + (R_Q/X_Q)^2}} \quad (4)$$



Obr. 7. – schéma soustavy a náhradní schéma pro síťové napáječe

Je-li zkrat napájen ze sítě vysokého napětí nebo velmi vysokého napětí a zvláště vysokého napětí, u které je znám pouze počáteční souměrný rázový zkratový proud I''_{kQ} v bodě připojení Q, pak lze souslednou ekvivalentní zkratovou impedanci Z_{Qt} vztaženou ke straně transformátoru s nižším napětím určit jako:

$$Z_{Qt} = \frac{cU_{nQ}}{\sqrt{3} \cdot I''_{kQ}} \cdot \frac{1}{t_r^2} \quad (5)$$

kde U_{nQ} jmenovité napětí soustavy v bodě připojení napáječe Q
 I''_{kQ} počáteční souměrný rázový proud
 c napěťový součinitel pro napětí U_{nQ}
 t_r jmenovitý převod transformátoru, při kterém se přepínač odboček nachází v základní poloze

V případě napáječů se jmenovitým napětím nad 35 kV napájených z venkovních vedení je možné ekvivalentní impedanci \underline{Z}_Q považovat za reaktanci, tj. $\underline{Z}_Q = 0 + jX_Q$.

Transformátory

Sousledné zkratové impedance dvouvinutových transformátorů $\underline{Z}_T = R_T + jX_T$ je možné vypočítat ze jmenovitých údajů transformátorů následovně:

$$Z_T = \frac{u_{kr}}{100 \%} \cdot \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}} \quad (6)$$

$$R_T = \frac{u_{Rr}}{100 \%} \cdot \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}} = \frac{P_{krT}}{3I_{rT}^2} \quad (7)$$

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} \quad (8)$$

kde U_{rT} jmenovité napětí transformátoru na straně vyššího nebo nižšího napětí
 I_{rT} jmenovitý proud transformátoru na straně vyššího nebo nižšího napětí
 S_{rT} jmenovitý zdánlivý výkon transformátoru
 P_{krT} jmenovité ztráty nakrátko transformátoru
 u_{kr} jmenovité napětí nakrátko v procentech
 u_{Rr} činná složka jmenovitého napětí nakrátko transformátoru v procentech

Potřebné údaje pro výpočet lze najít na štítku stroje nebo získat od výrobce.

Ohmickou složku impedance lze vypočítat ze jmenovitých ztrát transformátoru nakrátko P_{krT} ve vinutí při jmenovitém proudu I_{rT} .

Poměr R_T/X_T obvykle roste s velikostí transformátoru. U velkých transformátorů je odpor tak malý že je možné při výpočtu velikosti zkratového proudu uvažovat, že impedanci představuje pouze reaktance. Odpor je nutné uvažovat pouze tehdy, jestliže se má vypočítat *nárazový zkratový proud* i_p nebo *stejnoseměrná složka* $i_{d.c.}$.

Korekční součinitelé pro impedance síťových transformátorů

Síťový transformátor je transformátor spojující dvě nebo více sítí s rozdílným napětím. U dvouvinutových transformátorů s přepínačem odboček při zatížení i bez něj se musí navíc k impedancím zavést korekční součinitel K_T : $\underline{Z}_{TK} = K_T \underline{Z}_T$ kde $\underline{Z}_T = R_T + jX_T$

$$K_T = 0,95 \frac{c_{\max}}{1 + 0,6x_T} \quad (9)$$

kde x_T je poměrná reaktance transformátoru $x_T = X_T / (U_{rT}^2 / S_{rT})$ a c_{\max} z tabulky 1. odpovídá jmenovitému napětí sítě připojené ke straně nižšího napětí síťového transformátoru.

Tento korekční součinitel se nesmí použít pro blokové transformátory.

Venkovní vedení a kabely

Souslednou zkratovou impedanci $\underline{Z}_L = R_L + jX_L$ lze vypočítat z parametrů vodiče, jako jsou průřezy a rozteče vodičů.

Činná rezistance na jednotku délky R'_L venkovních vedení při 20 °C:

$$R'_L = \frac{\rho}{q_n} \quad (10)$$

kde ρ – rezistivita

$$\text{měď } \rho = \frac{1}{54} \Omega \text{mm}^2 \text{m}^{-1} \quad \text{hliník } \rho = \frac{1}{34} \Omega \text{mm}^2 \text{m}^{-1}$$

$$\text{slitina hliníku } \rho = \frac{1}{31} \Omega \text{mm}^2 \text{m}^{-1}$$

q_n – jmenovitý průřez

Reaktance na jednotku délky X'_L pro venkovní vedení:

$$X'_L = 2\pi f \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\frac{1}{4n} + \ln \frac{d}{r} \right) = f\mu_0 \left(\frac{1}{4n} + \ln \frac{d}{r} \right) \quad (11)$$

kde $d = \sqrt[3]{d_{L1L2} d_{L2L3} d_{L3L1}}$ geometrická střední vzdálenost mezi vodiči či středem svazků

r – poloměr jednoduchého vodiče, u svazkových vodičů $r_B = \sqrt[n]{nrR^{n-1}}$ R – poloměr svazku

n – počet vodičů ve svazku

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Hm}^{-1}$$

Reaktory omezující zkratový proud

Sousledné, zpětné a netočivé zkratové impedance jsou stejné za předpokladu geometrické souměrnosti. Reaktory omezující zkratový proud se považují za součást zkratové impedance.

$$Z_R = \frac{u_{kR}}{100\%} \cdot \frac{U_n}{\sqrt{3} \cdot I_{rR}} \quad R_R \ll X_R \quad (12)$$

kde u_{kR} – impedanční napětí reaktoru v %

I_{rR} – jmenovitý proud reaktoru v A

u_{kR} a I_{rR} jsou uvedeny na štítku

U_n – jmenovité napětí soustavy

Synchronní stroje

Synchronní generátory:

Při výpočtu počátečních souměrných rázových zkratových proudů v soustavách napájených přímo z generátorů bez blokových transformátorů, například v průmyslových sítích, nebo nízkonapětových sítích je třeba použít v sousledné složkové soustavě následující impedanci:

$$\underline{Z}_{GK} = K_G \underline{Z}_G = K_G (R_G + jX'_d) \quad (13)$$

korekční součinitel:

$$K_G = \frac{U_n}{U_{rG}} \cdot \frac{c_{\max}}{1 + x''_d \cdot \sin \varphi_{rG}} \quad (14)$$

kde c_{\max} – napětový součinitel

U_n – jmenovité napětí soustavy

U_{rG} – jmenovité napětí generátoru

\underline{Z}_{GK} – korigovaná impedance generátoru

\underline{Z}_G – rázová impedance generátoru v sousledné soustavě

φ_{rG} – fázový úhel mezi \underline{I}_{rG} a $\underline{U}_{rG}/\sqrt{3}$

x_d'' – poměrná rázová reaktance generátoru vztažená ke jmenovité impedanci

$$x_d'' = X_d''/Z_{rG} \quad \text{kde} \quad Z_{rG} = U_{rG}^2/S_{rG}$$

S dostatečnou přesností lze použít následující hodnoty pro fiktivní rezistanci R_{Gf} :

$$R_{Gf} = 0,05 \cdot X_d'' \quad \text{pro generátory s } U_{rG} > 1 \text{ kV a } S_{rG} \geq 100 \text{ MVA}$$

$$R_{Gf} = 0,07 \cdot X_d'' \quad \text{pro generátory s } U_{rG} > 1 \text{ kV a } S_{rG} < 100 \text{ MVA}$$

$$R_{Gf} = 0,15 \cdot X_d'' \quad \text{pro generátory s } U_{rG} \leq 1000 \text{ V}$$

Synchronní kompenzátory a motory:

Synchronní kompenzátory jsou uvažovány stejně jako synchronní generátory. Pokud mají synchronní motory napěťovou regulaci, jsou uvažovány jako synchronní generátory. Když nemají regulaci, je třeba použít zvláštní postupy.

Elektrárenský blok

Pro výpočet impedance celého elektrárenského bloku s přepínačem odboček při zatížení slouží rovnice:

$$\underline{Z}_S = K_S (t_r^2 \cdot \underline{Z}_G + \underline{Z}_{THV}) \quad (15)$$

(používá se pro výpočet zkratu na straně vyššího napětí blokového transformátoru) s korekčním součinitelem:

$$K_S = \frac{U_{nQ}^2}{U_{rG}^2} \cdot \frac{U_{rTLV}^2}{U_{rTHV}^2} \cdot \frac{c_{\max}}{1 + |x_d'' - x_T| \cdot \sin \varphi_{rG}} \quad (16)$$

kde \underline{Z}_S – korigovaná impedance elektrárenského bloku s přepínačem odboček při zatížení, vztažená ke straně vyššího napětí

\underline{Z}_G – počáteční rázová impedance generátoru $\underline{Z}_G = R_G + jX_d''$ bez korekčního součinitele

\underline{Z}_{THV} – impedance blokového transformátoru vztažená ke straně vyššího napětí, bez korekčního součinitele

U_{nQ} – jmenovité napětí soustavy

U_{rG} – jmenovité napětí generátoru

φ_{rG} – fázový úhel mezi \underline{I}_{rG} a $\underline{U}_{rG}/\sqrt{3}$

x_d'' – poměrná rázová reaktance generátoru vztažená ke jmenovité impedanci

$$x_d'' = X_d''/Z_{rG}, \quad \text{kde} \quad Z_{rG} = U_{rG}^2/S_{rG}$$

x_T – poměrná reaktance blokového transformátoru $x_T = X_T/(U_{rT}^2/S_{rT})$

t_r – jmenovitý převod blokového transformátoru $t_r = U_{rTHV}/U_{rTLV}$

Asynchronní motory

Motory vysokého napětí a nízkého napětí přispívají k počátečnímu souměrnému rázovému zkratovému proudu I_k'' , k nárazovému proudu i_p , k souměrnému zkratovému vypínacímu proudu I_b a u nesouměrných zkratů také k ustálenému zkratovému proudu I_k .

Příspěvek asynchronních motorů v nízkonapěťové soustavě ke zkratovému proudu I_k'' se může zanedbat, jestliže tento příspěvek není větší než 1 % počátečního zkratového proudu I_{kM}'' , vypočítaného bez příspěvku těchto motorů.

$$\sum I_{rM} \leq 0,01 \cdot I_{kM}'' \quad (17)$$

kde $\sum I_{rM}$ – součet jmenovitých proudů motorů připojených přímo (bez transformátorů) v síti
kde se vyskytl zkrat

I_{kM}'' – počáteční souměrný rázový zkratový proud bez vlivu motorů

Impedance $\underline{Z}_M = R_M + jX_M$ asynchronních motorů v sousledné a zpětné složkové soustavě:

$$Z_M = \frac{1}{\frac{I_{LR}}{I_{rM}}} \cdot \frac{U_{rM}}{\sqrt{3} \cdot I_{rM}} = \frac{1}{\frac{I_{LR}}{I_{rM}}} \cdot \frac{U_{rM}^2}{S_{rM}} \quad (18)$$

kde U_{rM} – jmenovité napětí motoru

I_{rM} – jmenovitý proud motoru

S_{rM} – jmenovitý zdánlivý příkon motoru

$\frac{I_{LR}}{I_{rM}}$ – poměr záběrného proudu ke jmenovitému proudu motoru při zabrzděném motoru

Jestliže je znám R_M / X_M pak X_M se počítá následovně:

$$X_M = \frac{Z_M}{\sqrt{1 + (R_M / X_M)^2}} \quad (19)$$

Následující vztahy lze použít s dostatečnou přesností:

$$R_M / X_M = 0,10 \quad X_M = 0,995 \cdot Z_M \quad \text{pro motory vysokého napětí o výkonu } P_{rM} \geq 1 \text{ MW}$$

$$R_M / X_M = 0,15 \quad X_M = 0,989 \cdot Z_M \quad \text{pro motory vysokého napětí o výkonu } P_{rM} < 1 \text{ MW}$$

$$R_M / X_M = 0,42 \quad X_M = 0,922 \cdot Z_M \quad \text{pro skupiny nízkonapěťových motorů včetně připojovacích kabelů}$$

Příspěvek zkratových proudů od asynchronních motorů

Asynchronní motory, jež jsou připojeny k síti ve které dochází ke zkratu přes dvouvinutové transformátory, lze zanedbat při výpočtu zkratových proudů v bodě připojení napáječe Q (viz Obr. 8.), pokud je splněna podmínka: (tento odhad není dovolen v případě trojvinutových transformátorů!)

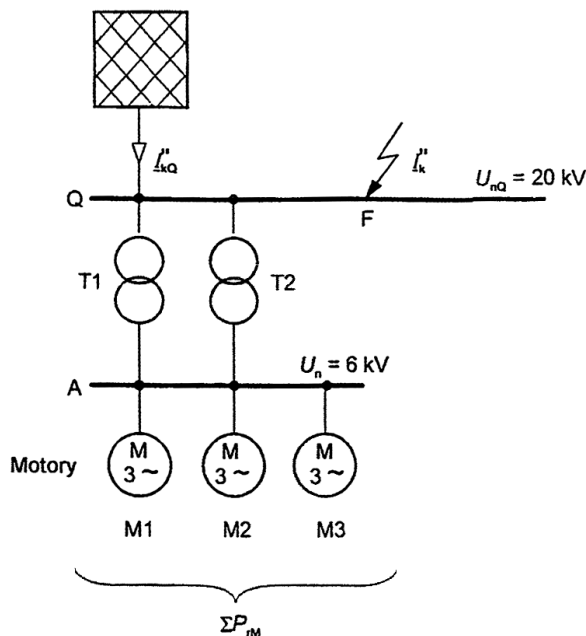
$$\frac{\sum P_{rM}}{\sum S_{rT}} \leq \frac{0,8}{\left| \frac{c \cdot 100 \sum S_{rT}}{\sqrt{3} \cdot U_{nQ} \cdot I_{kQ}''} - 0,3 \right|} \quad (20)$$

kde $\sum P_{rM}$ – součet jmenovitých činných výkonů uvažovaných motorů

$\sum S_{rT}$ – součet jmenovitých zdánlivých výkonů všech transformátorů, přes které jsou motory napájeny

I''_{kQ} – počáteční souměrný rázový zkratový proud v bodě připojení Q bez příspěvku motorů

U_{nQ} – jmenovité napětí soustavy v bodě Q



Obr. 8. – příklad příspěvku zkratových proudů asynchronních motorů

Výpočet zkratových proudů [1, str. 36-60]

V případě vzdáleného zkratu se zkratový proud počítá jako součet následujících dvou složek:

1. střídavé složky s konstantní amplitudou po celou dobu zkratu
2. stejnosměrné složky začínající na počáteční hodnotě A a klesající směrem k nule (viz Obr. 3.)

V případě blízkého zkratu je zkratový proud uvažován jako součet následujících dvou složek:

1. střídavé složky se zmenšující se amplitudou po celou dobu zkratu
2. stejnosměrné složky začínající na počáteční hodnotě A a klesající směrem k nule (viz Obr. 4.)

Počáteční souměrný rázový zkratový proud I''_k

1. trojfázový zkrat:

Obecně se počáteční souměrný rázový zkratový proud I''_k počítá z napětí ekvivalentního napětíového zdroje $cU_n / \sqrt{3}$ a zkratové impedance $\underline{Z}_k = R_k + jX_k$.

$$I''_k = \frac{cU_n}{\sqrt{3} \cdot Z_k} = \frac{cU_n}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{R_k^2 + X_k^2}} \quad (21)$$

2. dvoufázový zkrat:

$$I''_{k2} = \frac{cU_n}{|\underline{Z}_{(1)} + \underline{Z}_{(2)}|} = \frac{cU_n}{2|\underline{Z}_{(1)}|} = \frac{\sqrt{3}}{2} I''_k \quad (22)$$

V počátečním období zkratu je zpětná impedance přibližně rovna sousledné impedanci nezávisle na tom, zda jde o blízký nebo vzdálený zkrat. Proto lze zavést, že $\underline{Z}_{(2)} = \underline{Z}_{(1)}$.

3. dvoufázový zemní zkrat:

K výpočtu počátečních souměrných rázových zkratových proudů je nutné rozlišit proudy I''_{k2EL2} , I''_{k2EL3} a I''_{kE2E} . Pro vzdálené zkraty je $\underline{Z}_{(2)}$ přibližně rovno $\underline{Z}_{(1)}$. Pokud je v tomto případě $\underline{Z}_{(0)}$ menší než $\underline{Z}_{(2)}$, proud I''_{kE2E} , který prochází zemí nebo zemnicími vodiči je největší ze všech počátečních souměrných rázových zkratových proudů I''_k , I''_{k2} , I''_{k2E} a I''_{k1} .

$$I''_{k2EL2} = -jcU_n \frac{\underline{Z}_{(0)} - a\underline{Z}_{(2)}}{\underline{Z}_{(1)}\underline{Z}_{(2)} + \underline{Z}_{(1)}\underline{Z}_{(0)} + \underline{Z}_{(2)}\underline{Z}_{(0)}} \quad (23)$$

$$I''_{k2EL3} = jcU_n \frac{\underline{Z}_{(0)} - a^2\underline{Z}_{(2)}}{\underline{Z}_{(1)}\underline{Z}_{(2)} + \underline{Z}_{(1)}\underline{Z}_{(0)} + \underline{Z}_{(2)}\underline{Z}_{(0)}} \quad (24)$$

$$I''_{kE2E} = \frac{\sqrt{3} \cdot cU_n \underline{Z}_{(2)}}{\underline{Z}_{(1)}\underline{Z}_{(2)} + \underline{Z}_{(1)}\underline{Z}_{(0)} + \underline{Z}_{(2)}\underline{Z}_{(0)}} \quad (25)$$

U vzdáleného zkratu s $\underline{Z}_{(2)} = \underline{Z}_{(1)}$:

$$I''_{k2EL2} = cU_n \frac{\left| \underline{Z}_{(0)} / \underline{Z}_{(1)} - a \right|}{\left| \underline{Z}_{(1)} + 2\underline{Z}_{(0)} \right|} \quad (26)$$

$$I''_{k2EL3} = cU_n \frac{\left| \underline{Z}_{(0)} / \underline{Z}_{(1)} - a^2 \right|}{\left| \underline{Z}_{(1)} + 2\underline{Z}_{(0)} \right|} \quad (27)$$

$$I''_{kE2E} = \frac{\sqrt{3} \cdot cU_n}{\left| \underline{Z}_{(1)} + 2\underline{Z}_{(0)} \right|} \quad (28)$$

4. jednofázový zkrat:

$$I''_{k1} = \frac{\sqrt{3} \cdot cU_n}{\underline{Z}_{(1)} + \underline{Z}_{(2)} + \underline{Z}_{(0)}} \quad (29)$$

U vzdáleného zkratu s $\underline{Z}_{(2)} = \underline{Z}_{(1)}$:

$$I''_{k1} = \frac{\sqrt{3} \cdot cU_n}{\left| 2\underline{Z}_{(1)} + \underline{Z}_{(0)} \right|} \quad (30)$$

Nárazový zkratový proud i_p

Nárazový zkratový proud i_p namáhá celý obvod zkratu – tj. vypínače, sběrnice, vinutí transformátoru apod. – elektrodynamickými silami. Definován je jako vrcholová hodnota první amplitudy zkratového proudu při největší možné stejnosměrné složce.

1. trojfázový zkrat:

$$i_p = \kappa\sqrt{2} \cdot I''_k \quad (31)$$

2. dvoufázový zkrat:

$$i_{p2} = \kappa\sqrt{2} \cdot I''_{k2} \quad (32)$$

3. dvoufázový zemní zkrat:

$$i_{p2E} = \kappa \sqrt{2} \cdot I''_{k2E} \quad (33)$$

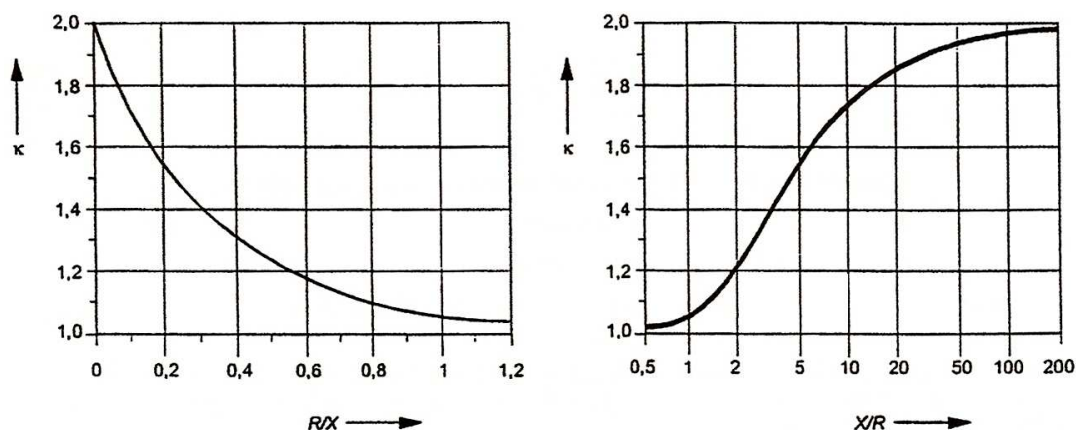
5. jednofázový zkrat:

$$i_{p1} = \kappa \sqrt{2} \cdot I''_{k1} \quad (34)$$

Součinitel κ pro poměr R/X nebo X/R lze vypočítat podle vztahu:

$$\kappa = 1,02 + 0,98e^{-3\frac{R}{X}} \quad (35)$$

nebo určit z grafu:



Obr. 9. – součinitel κ jako funkce poměru R/X nebo X/R

Stejnoseměrná složka zkratového proudu

$$i_{d.c.} = \sqrt{2} \cdot I''_k \cdot e^{-2\pi \cdot f \cdot t \cdot R/X} \quad (36)$$

kde I''_k počáteční souměrný rázový zkratový proud

f jmenovitý kmitočet

t čas

R/X poměr podle rovnice (35) nebo Obr. 9.

Souměrný vypínací zkratový proud I_b

Vypínací zkratový proud v místě zkratu se skládá ze symetrického zkratového proudu I_b a stejnosměrné složky zkratového proudu $i_{d.c.}$ v nejkratší době vypnutí t_{min} .

Vzdálený zkrat:

U vzdálených zkratů jsou zkratové souměrné vypínací proudy rovny počátečním rázovým zkratovým proudům:

$$I_b = I''_k \quad (37)$$

$$I_{b2} = I''_{k2} \quad (38)$$

$$I_{b2E} = I''_{k2E} \quad (39)$$

$$I_{b1} = I''_{k1} \quad (40)$$

Blízký zkrat:

1. jednoduchý trojfázový zkrat:

V případě jednoduchého napájení zkratu se zmenšování souměrného zkratového vypínacího proudu zohledňuje pomocí součinitele μ :

$$I_b = \mu \cdot I_k'' \quad (41)$$

Součinitel μ závisí na minimální době vypnutí t_{min} a poměru I_{kG}''/I_{rG} , kde I_{rG} je jmenovitý proud generátoru. Hodnoty podle následujících rovnic se použijí, pokud jsou synchronní stroje buzeny pomocí točivých budičů nebo statických budičů (za předpokladu, že pro statické budiče je minimální časové zpoždění t_{min} menší než 0,25 s a maximální budičí napětí je menší než 1,6 násobek budičího napětí při jmenovitém zatížení). Pro všechny ostatní případy se bere hodnota $\mu=1$, pokud není známa přesná hodnota.

$$\begin{aligned} \mu &= 0,84 + 0,26 \cdot e^{-0,26 \cdot I_{kG}''/I_{rG}} & \text{pro } t_{min} &= 0,02 \text{ s} \\ \mu &= 0,71 + 0,51 \cdot e^{-0,30 \cdot I_{kG}''/I_{rG}} & \text{pro } t_{min} &= 0,05 \text{ s} \\ \mu &= 0,62 + 0,72 \cdot e^{-0,32 \cdot I_{kG}''/I_{rG}} & \text{pro } t_{min} &= 0,10 \text{ s} \\ \mu &= 0,56 + 0,94 \cdot e^{-0,38 \cdot I_{kG}''/I_{rG}} & \text{pro } t_{min} &= 0,25 \text{ s} \end{aligned} \quad (42)$$

Když je mezi generátorem a místem zkratu blokový transformátor, pak příspěvek zkratového proudu I_{kS}'' na straně vyššího napětí blokového transformátoru se musí před výpočtem μ přepočítat pomocí jmenovitého transformačního převodu na svorky generátoru $I_{kG}'' = t_r \cdot I_{kS}''$.

Pokud I_{kG}''/I_{rG} není větší než 2, platí že $\mu=1$ pro všechny hodnoty minimální doby vypnutí t_{min} .

2. nesouměrné zkraty

Při nesouměrných zkratových proudech se nebere v úvahu pokles magnetického toku v generátoru a použijí se rovnice (38) až (40).

Ustálený zkratový proud I_k

Výpočet ustáleného zkratového proudu I_k je méně přesný než výpočet počátečního rázového zkratového proudu I_k'' .

Pro vzdálené trojfázové zkraty napájené přímo z jednoho synchronního generátoru nebo z jednoho elektrárenského bloku závisí ustálený zkratový proud I_k na systému buzení, napěťové regulaci a vlivu sycení.

Maximální ustálený zkratový proud:

Při výpočtu maximálního ustáleného zkratového proudu se počítá s maximálním buzením synchronního generátoru.

$$I_{k \max} = \lambda_{\max} I_{rG} \quad (43)$$

Pro soustavy se statickým buzením napájeným ze svorek generátoru dojde při zkratu na svorkách ke zhroucení svorkového a budičího napětí, takže je v tomto případě $\lambda_{\max} = \lambda_{\min} = 0$.

λ_{\max} se může získat z Obr. 10. pro stroje s hladkým rotorem nebo vyniklými póly.

Křivky λ_{\max} série 1 – vycházejí z největšího možného budičího napětí buď 1,3 krát jmenovitého budičího proudu při jmenovitém zatížení a účinníku pro stroje s hladkým rotorem nebo 1,6 krát jmenovité buzení pro stroje s vyniklými póly.

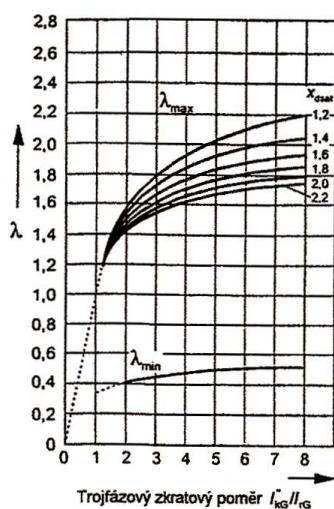
Křivky λ_{max} série 2 – vycházejí z největšího možného budicího napětí buď 1,6 krát jmenovitého budicího proudu při jmenovitém zatížení a účinnku pro stroje s hladkým rotorem nebo 2,0 krát jmenovité buzení pro stroje s vyniklými póly.

Minimální ustálený zkratový proud:

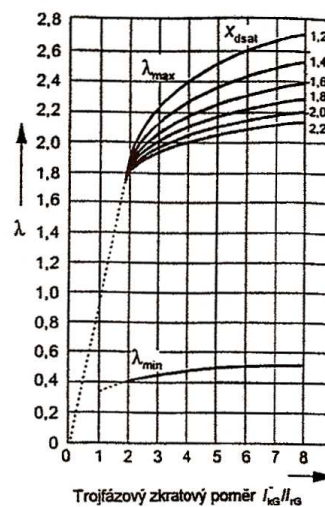
Pro minimální ustálený zkratový proud se předpokládá konstantní buzení nezatíženého synchronního stroje.

$$I_{k \min} = \lambda_{\min} I_{rG} \quad (44)$$

Hodnoty λ_{\min} lze získat z Obr.10. V případě minimálního ustáleného zkratového proudu se uvažuje $c = c_{\min}$ podle tabulky 1.

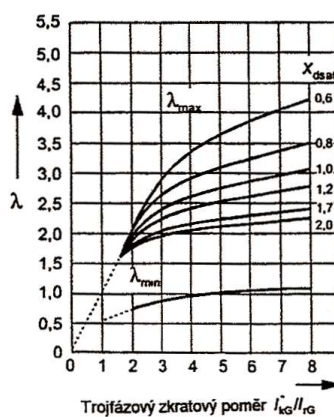


Součinitelé λ_{\min} a λ_{\max} série 1

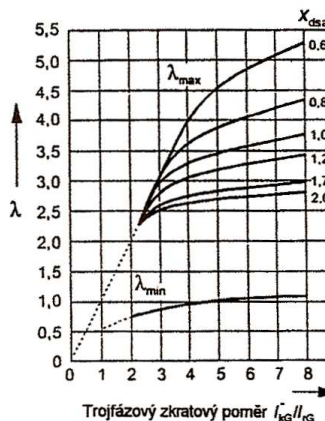


Součinitelé λ_{\min} a λ_{\max} série 2

Součinitelé λ_{\min} a λ_{\max} pro stroje s hladkým rotorem



Součinitelé λ_{\min} a λ_{\max} série 1



Součinitelé λ_{\min} a λ_{\max} série 2

Součinitelé λ_{\min} a λ_{\max} pro stroje s vyniklými póly

Obr. 10. – součinitelé λ_{\min} a λ_{\max}

Ekvivalentní oteplovací zkratový proud I_{th}

Integrál $\int i^2 dt$ určuje energii vytvářenou v odporovém prvku soustavy průchodem zkratového proudu. V této normě je vypočítána použitím součinitele m pro časově závislý tepelný účinek stejnosměrné složky zkratového proudu a součinitele n pro časově závislý tepelný účinek střídavé složky zkratového proudu. (viz Obr. 11. a 12.)

$$\int_0^{T_k} i^2 dt = I_k'^2 (m + n) \cdot T_k = I_{th}^2 \cdot T_k \quad (45)$$

Ekvivalentní oteplovací zkratový proud je:

$$I_{th} = I_k'' \sqrt{m + n} \quad (46)$$

Pro sérii i ($i=1,2,3,\dots,r$) po sobě následujících trojfázových jednotlivých zkratových proudů se musí použít následující rovnice pro výpočet Jouleova integrálu nebo ekvivalentního oteplovacího zkratového proudu.

$$\int i^2 dt = \sum_{i=1}^{i=r} I_{ki}'^2 (m_i + n_i) \cdot T_{ki} = I_{th}^2 \cdot T_k \quad (47)$$

$$I_{th} = \sqrt{\frac{\int i^2 dt}{T_k}} \quad (48)$$

$$T_k = \sum_{i=1}^{i=r} T_{ki} \quad (49)$$

kde	I_{ki}'	počáteční souměrný trojfázový rázový zkratový proud u každého zkratu
	I_{th}	ekvivalentní oteplovací zkratový proud
	m_i	součinitel pro tepelné účinky stejnosměrné složky pro každý zkratový proud
	n_i	součinitel pro tepelné účinky střídavé složky pro každý zkratový proud
	T_{ki}	doba trvání zkratového proudu u každého zkratu
	T_k	součet dob trvání pro všechny zkratové proudy

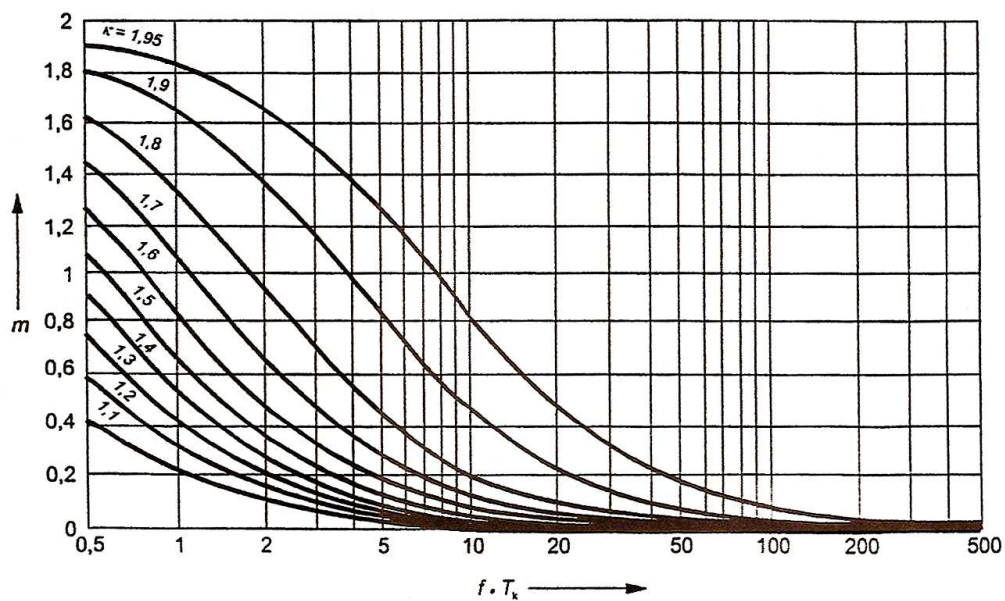
Součinitel m se získá z Obr. 11. s použitím $f \cdot T_{ki}$ a součinitele κ (viz rovnice (35) nebo Obr.9.). Součinitel n se získá z Obr. 12. s použitím T_{ki} a I_{ki}''/I_{ki}' , kde I_{ki}' je ustálený zkratový proud pro každý zkrat.

Pro výpočet ekvivalentního oteplovacího proudu v trojfázových střídavých soustavách je rozhodující trojfázový zkratový proud.

Jouleův integrál a ekvivalentní oteplovací zkratový proud by měly být vždy udány s dobou trvání zkratu, se kterým jsou spojeny.

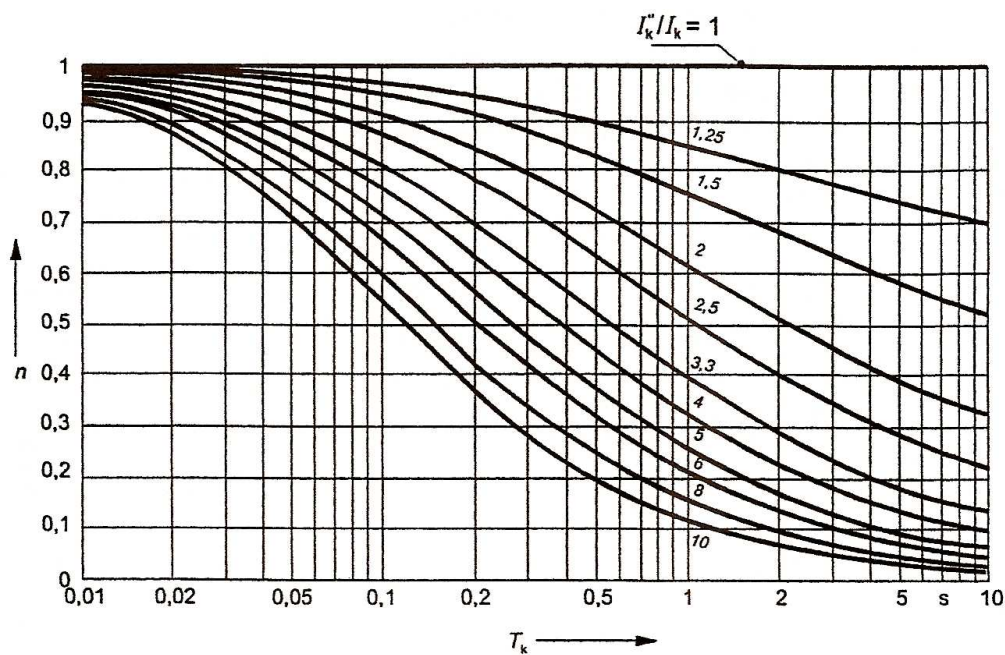
Pro distribuční síť (elektricky vzdálené zkraty je obvykle možné použít $n = 1$.

U vzdálených zkratů se jmenovitou dobou trvání zkratu 0,5s a více je dovolené uvažovat $m + n = 1$



Součinitel m pro tepelný účinek stejnosměrné složky zkratového proudu

Obr. 11. – součinitel m



Součinitel n pro tepelný účinek střídavé složky zkratového proudu

Obr. 12. – součinitel n

Příklad výpočtu zkratových proudů

Do průmyslového závodu je dodávána elektrická energie z veřejné rozvodné sítě podle Obr.13. Vstupní rozvodna závodu je 110 kV a je napájena z těchto zdrojů:

Elektrárna EL1, 3 x 68,75 MVA

Elektrárna EL2, 2 x 40 MVA

Síť S1, 110 kV, o počátečním rázovém zkratovém výkonu 2000 MVA

Síť S2, 400 kV, o počátečním rázovém zkratovém výkonu 20 000 MVA

Síť S3, 220 kV, o počátečním rázovém zkratovém proudu 25 kA

V závodě je proveden rozvod soustavou napětí 6 kV, která je napájena z rozvodny 110 kV dvěma transformátory 10 MVA. Z přípojnice 6 kV rozvodny jsou napájeny tři asynchronní motory o výkonu 3 MW.

Je třeba určit počáteční rázové zkratové proudy a nárazové zkratové proudy při trojfázovém, dvojfázovém, dvojfázovém zemním a jednofázovém zkratu:

- 1) na přípojnicích rozvodny 110 kV (místo označené „A“)
- 2) na přípojnicích 6 kV rozvodny (místo označené „B“)

Zkratové impedance elektrických zařízení:

Sít' S1: $S''_{kQ} = 2000 \text{ MVA}$ $U_{nQ} = 110 \text{ kV}$

počáteční rázový zkratový výkon \Rightarrow počáteční rázový zkratový proud:

$$S''_{kQ} = \sqrt{3} \cdot U_{nQ} \cdot I''_{kQ} \Rightarrow I''_{kQ} = \frac{S''_{kQ}}{\sqrt{3} \cdot U_{nQ}} = \frac{2000 \text{ MVA}}{\sqrt{3} \cdot 110 \text{ kV}} = 10,5 \text{ kA}$$

impedance sítě: (zanedbáme odpor a budeme uvažovat že impedanci sítě představuje pouze reaktance)

$$Z_Q = \frac{cU_{nQ}}{\sqrt{3} \cdot I''_{kQ}} = \frac{1,1 \cdot 110 \text{ kV}}{\sqrt{3} \cdot 10,5 \text{ kA}} = 6,653 \Omega \quad \underline{\underline{Z_Q = 0 + j6,653 \Omega}}$$

Sít' S2: $S''_{kQ} = 20000 \text{ MVA}$ $U_{nQ} = 400 \text{ kV}$

počáteční rázový zkratový výkon \Rightarrow počáteční rázový zkratový proud:

$$I''_{kQ} = \frac{S''_{kQ}}{\sqrt{3} \cdot U_{nQ}} = \frac{20000 \text{ MVA}}{\sqrt{3} \cdot 400 \text{ kV}} = 28,9 \text{ kA}$$

jmenovitý převod transformátoru T1:

$$t_r = \frac{U_{rTHV}}{U_{rTLV}} = \frac{400 \text{ kV}}{110 \text{ kV}} = 3,64$$

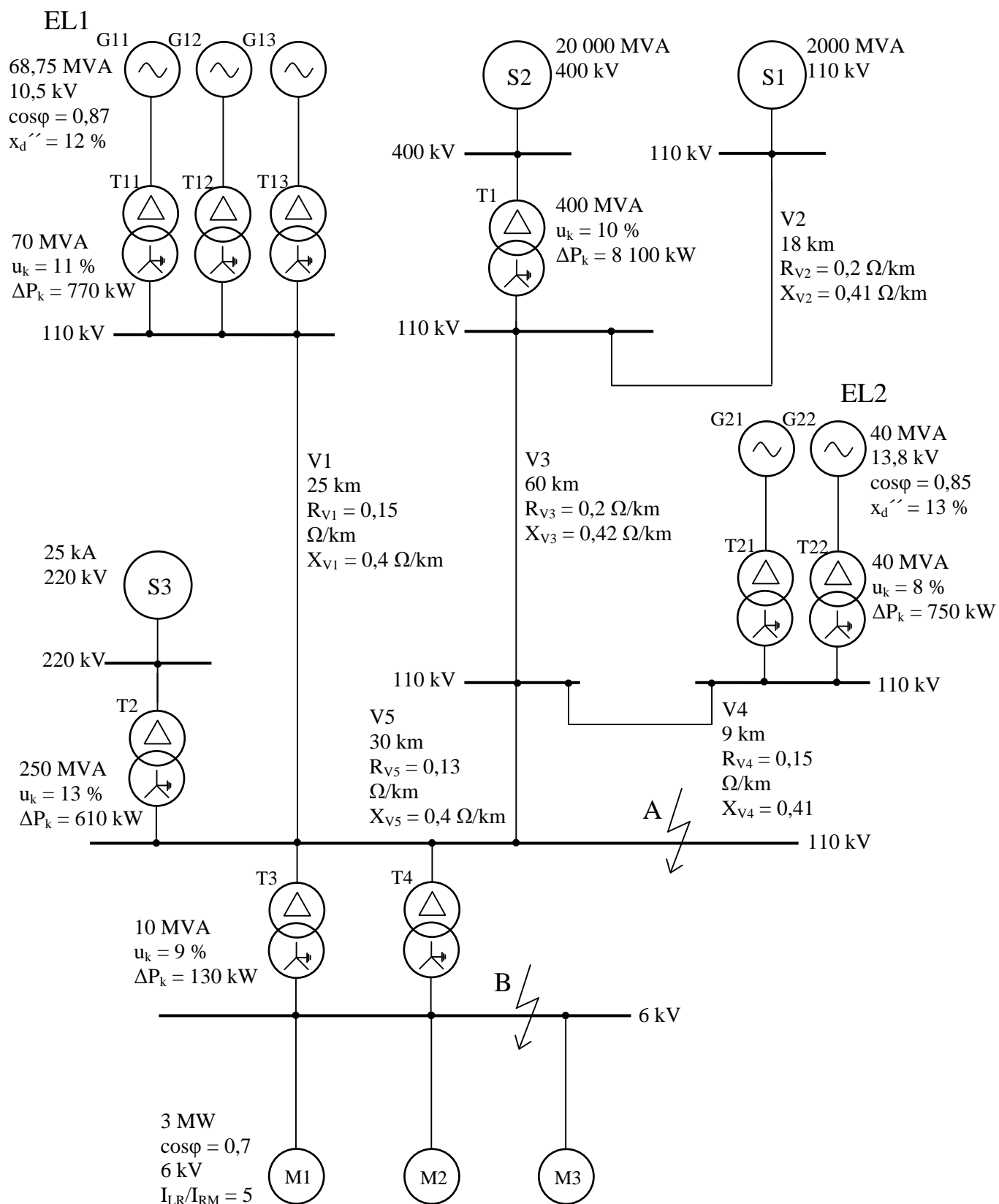
impedance sítě:

$$Z_{Qt} = \frac{cU_{nQ}}{\sqrt{3} \cdot I''_{kQ}} \cdot \frac{1}{t_r^2} = \frac{1,1 \cdot 400 \text{ MVA}}{\sqrt{3} \cdot 28,9 \text{ kV}} \cdot \frac{1}{3,64^2} = 0,663 \Omega \quad \underline{\underline{Z_{Qt} = 0 + j0,663 \Omega}}$$

Sít' S3: $I''_{kQ} = 25 \text{ kA}$ $U_{nQ} = 220 \text{ kV}$

$$t_r = \frac{U_{rTHV}}{U_{rTLV}} = \frac{220 \text{ kV}}{110 \text{ kV}} = 2$$

$$Z_{Qt} = \frac{cU_{nQ}}{\sqrt{3} \cdot I''_{kQ}} \cdot \frac{1}{t_r^2} = \frac{1,1 \cdot 220 \text{ MVA}}{\sqrt{3} \cdot 25 \text{ kV}} \cdot \frac{1}{2^2} = 1,397 \Omega \quad \underline{\underline{Z_{Qt} = 0 + j1,397 \Omega}}$$



Obr. 13. – schéma elektrizační soustavy

Transformátor T1: 400/110 kV $S_{rT} = 400 \text{ MVA}$ $u_{kr} = 10 \%$ $P_{krT} = 8,1 \text{ MW}$

Jmenovitý proud na straně nižšího napětí:

$$I_{rT} = \frac{S_{rT}}{\sqrt{3} \cdot U_{rT}} = \frac{400 \text{ MVA}}{\sqrt{3} \cdot 110 \text{ kV}} = 2,1 \text{ kA}$$

impedance transformátoru (bez korekčního součinitele):

$$Z_{T1} = \frac{u_{kr}}{100 \%} \cdot \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}} = \frac{10}{100} \cdot \frac{110^2 \text{ kV}}{400 \text{ MVA}} = 3,025 \Omega$$

$$R_{T1} = \frac{P_{krT}}{3I_{rT}^2} = \frac{8,1}{3 \cdot 2,1^2} = 0,612 \Omega$$

$$X_{T1} = \sqrt{Z_{T1}^2 - R_{T1}^2} = \sqrt{3,025^2 - 0,612^2} = 2,962 \Omega$$

poměrná reaktance transformátoru:

$$x_{T1} = \frac{X_{T1}}{\frac{U_{rT}^2}{S_{rT}}} = \frac{2,962 \Omega}{\frac{110^2 \text{ kV}}{400 \text{ MVA}}} = 0,098$$

korekční součinitel K_{T1} :

$$K_{T1} = 0,95 \cdot \frac{c_{\max}}{1 + 0,6 \cdot x_{T1}} = 0,95 \cdot \frac{1,1}{1 + 0,6 \cdot 0,098} = 0,987$$

korigovaná impedance transformátoru T1:

$$\underline{Z}_{TK1} = K_{T1} \cdot (R_{T1} + jX_{T1})$$

$$Z_{TK1} = K_{T1} \cdot Z_{T1} = 0,987 \cdot 3,025 = 2,986 \Omega$$

$$R_{TK1} = K_{T1} \cdot R_{T1} = 0,987 \cdot 0,612 = 0,604 \Omega$$

$$X_{TK1} = K_{T1} \cdot X_{T1} = 0,987 \cdot 2,962 = 2,924 \Omega$$

$$\underline{Z}_{TK1} = \underline{0,604 + j2,924 \Omega}$$

Transformátor T2: 220/110 kV $S_{rT} = 250 \text{ MVA}$ $u_{kr} = 13 \%$ $P_{krT} = 0,61 \text{ MW}$

$$I_{rT} = \frac{S_{rT}}{\sqrt{3} \cdot U_{rT}} = \frac{250 \text{ MVA}}{\sqrt{3} \cdot 110 \text{ kV}} = 1,3 \text{ kA}$$

$$Z_{T2} = \frac{u_{kr}}{100 \%} \cdot \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}} = \frac{13}{100} \cdot \frac{110^2 \text{ kV}}{250 \text{ MVA}} = 6,292 \Omega$$

$$R_{T2} = \frac{P_{krT}}{3I_{rT}^2} = \frac{0,61}{3 \cdot 1,3^2} = 0,120 \Omega$$

$$X_{T2} = \sqrt{Z_{T2}^2 - R_{T2}^2} = \sqrt{6,292^2 - 0,120^2} = 6,291 \Omega$$

$$x_{T2} = \frac{X_{T2}}{\frac{U_{rT}^2}{S_{rT}}} = \frac{6,291 \Omega}{\frac{110^2 \text{ kV}}{250 \text{ MVA}}} = 0,130$$

$$K_{T2} = 0,95 \cdot \frac{c_{\max}}{1 + 0,6 \cdot x_{T2}} = 0,95 \cdot \frac{1,1}{1 + 0,6 \cdot 0,130} = 0,969$$

$$\underline{Z}_{TK2} = K_{T2} \cdot (R_{T2} + jX_{T2})$$

$$\begin{aligned}
Z_{TK2} &= K_{T2} \cdot Z_{T2} = 0,969 \cdot 6,292 = 6,097 \, \Omega \\
R_{TK2} &= K_{T2} \cdot R_{T2} = 0,969 \cdot 0,120 = 0,116 \, \Omega \\
X_{TK2} &= K_{T2} \cdot X_{T2} = 0,969 \cdot 6,291 = 6,096 \, \Omega \\
\underline{Z}_{TK2} &= \underline{0,116 + j6,096 \, \Omega}
\end{aligned}$$

Transformátory T3 = T4: 110/6 kV $S_{rT} = 10 \, \text{MVA}$ $u_{kr} = 9 \, \%$ $P_{krT} = 0,13 \, \text{MW}$

$$\begin{aligned}
I_{rT} &= \frac{S_r}{\sqrt{3} \cdot U_{rT}} = \frac{10 \, \text{MVA}}{\sqrt{3} \cdot 6 \, \text{kV}} = 0,962 \, \text{kA} \\
Z_{T3} &= \frac{u_{kr}}{100 \, \%} \cdot \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}} = \frac{9}{100} \cdot \frac{6^2 \, \text{kV}}{10 \, \text{MVA}} = 0,324 \, \Omega \\
R_{T3} &= \frac{P_{krT}}{3I_{rT}^2} = \frac{0,13}{3 \cdot 0,962^2} = 0,047 \, \Omega \\
X_{T3} &= \sqrt{Z_{T3}^2 - R_{T3}^2} = \sqrt{0,324^2 - 0,047^2} = 0,321 \, \Omega \\
x_{T3} &= \frac{X_{T3}}{\frac{U_{rT}^2}{S_{rT}}} = \frac{0,321 \, \Omega}{\frac{6^2 \, \text{kV}}{10 \, \text{MVA}}} = 0,089 \\
K_{T3} &= 0,95 \cdot \frac{c_{\max}}{1 + 0,6 \cdot x_{T3}} = 0,95 \cdot \frac{1,1}{1 + 0,6 \cdot 0,089} = 0,992 \\
\underline{Z}_{TK3} &= K_{T3} \cdot (R_{T3} + jX_{T3}) \\
Z_{TK3} &= K_{T3} \cdot Z_{T3} = 0,992 \cdot 0,324 = 0,321 \, \Omega \\
R_{TK3} &= K_{T3} \cdot R_{T3} = 0,992 \cdot 0,047 = 0,046 \, \Omega \\
X_{TK3} &= K_{T3} \cdot X_{T3} = 0,992 \cdot 0,321 = 0,318 \, \Omega \\
\underline{Z}_{TK3} &= \underline{0,046 + j0,318 \, \Omega}
\end{aligned}$$

Elektrárenský blok E1:

$$\begin{aligned}
S_{rG} &= 68,75 \, \text{MVA} & 10,5/110 \, \text{kV} \\
\cos \varphi_{rG} &= 0,87 \quad \Rightarrow \quad \sin \varphi_{rG} = 0,49 & S_{rT} = 70 \, \text{MVA} \\
U_{rG} &= 10,5 \, \text{kV} & u_{kr} = 11 \, \% \\
x_d'' &= 12 \, \% & \Delta P_{krT} = 0,77 \, \text{MW}
\end{aligned}$$

impedance elektrárenského bloku: $\underline{Z}_S = K_S (t_r^2 \cdot \underline{Z}_G + \underline{Z}_{THV})$

korekční součinitel: $K_S = \frac{U_{nQ}^2}{U_{rG}^2} \cdot \frac{U_{rTLV}^2}{U_{rTHV}^2} \cdot \frac{c_{\max}}{1 + |x_d'' - x_T| \cdot \sin \varphi_{rG}}$

jmenovitý proud blokového transformátoru na straně vyššího napětí:

$$I_{rT} = \frac{S_{rT}}{\sqrt{3} \cdot U_{rT}} = \frac{70 \, \text{MVA}}{\sqrt{3} \cdot 110 \, \text{kV}} = 0,37 \, \text{kA}$$

impedance blokového transformátoru (bez korekčního součinitele):

$$Z_{THV} = \frac{u_{kr}}{100 \%} \cdot \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}} = \frac{11}{100} \cdot \frac{110^2 \text{ kV}}{70 \text{ MVA}} = 19,014 \Omega$$

$$R_{THV} = \frac{P_{krT}}{3I_{rT}^2} = \frac{0,77}{3 \cdot 0,37^2} = 1,875 \Omega$$

$$X_{THV} = \sqrt{Z_{THV}^2 - R_{THV}^2} = \sqrt{19,014^2 - 1,875^2} = 18,921 \Omega$$

jmenovitá impedance generátoru:

$$Z_{rG} = \frac{U_{rG}^2}{S_{rG}} = \frac{10,5^2 \text{ kV}}{68,75 \text{ MVA}} = 1,604 \Omega$$

poměrná rázová reaktance generátoru \Rightarrow rázová reaktance generátoru:

$$x_d'' = \frac{X_d''}{Z_{rG}} \Rightarrow X_d'' = x_d'' \cdot Z_{rG} = 0,12 \cdot 1,604 = 0,192 \Omega$$

rezistance generátoru:

$$R_G = 0,07 \cdot X_d'' \quad (\text{generátor } U_{rG} > 1 \text{ kV a } S_{rG} < 100 \text{ MVA})$$

$$R_G = 0,07 \cdot X_d'' = 0,07 \cdot 0,192 = 0,013 \Omega$$

počáteční rázová impedance generátoru:

$$\underline{Z}_G = R_G + jX_d'' = 0,013 + j0,192 \Omega$$

jmenovitý převod blokového transformátoru:

$$t_r = \frac{U_{rTHV}}{U_{rTLV}} = \frac{110}{10,5} = 10,48$$

poměrná reaktance blokového transformátoru:

$$x_T = \frac{X_T}{\frac{U_{rT}^2}{S_{rT}}} = \frac{18,921 \Omega}{\frac{110^2 \text{ kV}}{70 \text{ MVA}}} = 0,109$$

korekční součinitel:

$$K_S = \frac{U_{nQ}^2}{U_{rG}^2} \cdot \frac{U_{rTLV}^2}{U_{rTHV}^2} \cdot \frac{c_{\max}}{1 + |x_d'' - x_T| \cdot \sin \varphi_{rG}} = \frac{1,1}{1 + |0,12 - 0,109| \cdot 0,49} = 1,09$$

impedance celého elektrárenského bloku:

$$\underline{Z}_S = K_S (t_r^2 \cdot \underline{Z}_G + \underline{Z}_{THV}) = 1,09 \cdot (10,48^2 \cdot (0,013 + j0,192) + 1,875 + j18,921)$$

$$\underline{Z}_S = 3,6 + j43,609 \Omega = 43,757 \angle 85,28^\circ \Omega$$

Elektrárenský blok E2:

$$S_{rG} = 40 \text{ MVA}$$

$$13,8/110 \text{ kV}$$

$$\cos \varphi_{rG} = 0,85 \Rightarrow \sin \varphi_{rG} = 0,53$$

$$S_{rT} = 40 \text{ MVA}$$

$$U_{rG} = 13,8 \text{ kV}$$

$$u_{kr} = 8 \%$$

$$x_d'' = 13 \%$$

$$\Delta P_{krT} = 0,75 \text{ MW}$$

$$I_{rT} = \frac{S_{rT}}{\sqrt{3} \cdot U_{rT}} = \frac{40 \text{ MVA}}{\sqrt{3} \cdot 110 \text{ kV}} = 0,21 \text{ kA}$$

$$Z_{THV} = \frac{u_{kr}}{100 \%} \cdot \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}} = \frac{8}{100} \cdot \frac{110^2 \text{ kV}}{40 \text{ MVA}} = 24,2 \Omega$$

$$R_{THV} = \frac{P_{krT}}{3I_{rT}^2} = \frac{0,75}{3 \cdot 0,21^2} = 5,669 \Omega$$

$$X_{THV} = \sqrt{Z_{THV}^2 - R_{THV}^2} = \sqrt{24,2^2 - 5,669^2} = 23,527 \Omega$$

$$Z_{rG} = \frac{U_{rG}^2}{S_{rG}} = \frac{13,8^2 \text{ kV}}{40 \text{ MVA}} = 4,761 \Omega$$

$$x_d'' = \frac{X_d''}{Z_{rG}} \Rightarrow X_d'' = x_d'' \cdot Z_{rG} = 0,13 \cdot 4,761 = 0,619 \Omega$$

$$R_G = 0,07 \cdot X_d'' \quad (\text{generátor } U_{rG} > 1 \text{ kV a } S_{rG} < 100 \text{ MVA})$$

$$R_G = 0,07 \cdot X_d'' = 0,07 \cdot 0,619 = 0,043 \Omega$$

$$\underline{Z}_G = R_G + jX_d'' = 0,043 + j0,619 \Omega$$

$$t_r = \frac{U_{rTHV}}{U_{rTLV}} = \frac{110}{13,8} = 7,97$$

$$x_T = \frac{X_T}{\frac{U_{rT}^2}{S_{rT}}} = \frac{23,527 \Omega}{\frac{110^2 \text{ kV}}{40 \text{ MVA}}} = 0,078$$

$$K_S = \frac{U_{nQ}^2}{U_{rG}^2} \cdot \frac{U_{rTLV}^2}{U_{rTHV}^2} \cdot \frac{c_{\max}}{1 + |x_d'' - x_T| \cdot \sin \varphi_{rG}} = \frac{1,1}{1 + |0,13 - 0,078| \cdot 0,53} = 1,07$$

$$\underline{Z}_S = K_S (t_r^2 \cdot \underline{Z}_G + \underline{Z}_{THV}) = 1,07 \cdot (7,97^2 \cdot (0,043 + j0,619) + 5,669 + j23,572)$$

$$\underline{Z}_S = 8,988 + j67,293 \Omega = 67,891 \angle 82,39^\circ \Omega$$

Transformátory T11 = T12 = T13: (viz elektrárenský blok E1)

10,5/110 kV

$S_{rT} = 70 \text{ MVA}$

$Z_{T11} = 19,014 \Omega$

$u_{kr} = 11 \%$

$R_{T11} = 1,875 \Omega$

$\underline{Z}_{T11} = 1,875 + j18,921 \Omega$

$\Delta P_{krT} = 0,77 \text{ MW}$

$X_{T11} = 18,921 \Omega$

$I_{rT} = 0,37 \text{ kA}$

poměrná reaktance transformátoru:

$$x_{T11} = \frac{X_{T11}}{\frac{U_{rT}^2}{S_{rT}}} = \frac{18,921 \Omega}{\frac{110^2 \text{ kV}}{70 \text{ MVA}}} = 0,109$$

korekční součinitel K_{T11} :

$$K_{T11} = 0,95 \cdot \frac{c_{\max}}{1 + 0,6 \cdot x_{T11}} = 0,95 \cdot \frac{1,1}{1 + 0,6 \cdot 0,109} = 0,981$$

korigovaná impedance transformátoru T11:

$$\underline{Z}_{TK11} = K_{T11} \cdot (R_{T11} + jX_{T11})$$

$$Z_{TK11} = K_{T11} \cdot Z_{T11} = 0,981 \cdot 19,014 = 18,653 \, \Omega$$

$$R_{TK11} = K_{T11} \cdot R_{T11} = 0,981 \cdot 1,875 = 1,839 \, \Omega$$

$$X_{TK11} = K_{T11} \cdot X_{T11} = 0,981 \cdot 18,921 = 18,562 \, \Omega$$

$$\underline{Z}_{TK11} = 1,839 + j18,562 \, \Omega = 18,653 \angle 84,34^\circ \, \Omega$$

Transformátory T21 = T22: (viz elektrárenský blok E2)

13,8/110 kV

$$S_{rT} = 40 \, MVA$$

$$Z_{T21} = 24,2 \, \Omega$$

$$u_{kr} = 8 \, \%$$

$$R_{T21} = 5,669 \, \Omega$$

$$\underline{Z}_{T21} = 5,669 + j23,527 \, \Omega$$

$$\Delta P_{krT} = 0,75 \, MW$$

$$X_{T21} = 23,527 \, \Omega$$

$$I_{rT} = 0,21 \, kA$$

$$x_{T21} = \frac{X_{T21}}{\frac{U_{rT}^2}{S_{rT}}} = \frac{23,527 \, \Omega}{\frac{110^2 \, kV}{40 \, MVA}} = 0,078$$

$$K_{T21} = 0,95 \cdot \frac{c_{\max}}{1 + 0,6 \cdot x_{T21}} = 0,95 \cdot \frac{1,1}{1 + 0,6 \cdot 0,078} = 0,998$$

$$\underline{Z}_{TK21} = K_{T21} \cdot (R_{T21} + jX_{T21})$$

$$Z_{TK21} = K_{T21} \cdot Z_{T21} = 0,998 \cdot 24,2 = 24,15 \, \Omega$$

$$R_{TK21} = K_{T21} \cdot R_{T21} = 0,998 \cdot 5,669 = 5,658 \, \Omega$$

$$X_{TK21} = K_{T21} \cdot X_{T21} = 0,998 \cdot 23,527 = 23,48 \, \Omega$$

$$\underline{Z}_{TK21} = 5,658 + j23,48 \, \Omega = 24,15 \angle 76,45^\circ \, \Omega$$

Asynchronní motory M1 = M2 = M3:

$$P_{rM} = 3 \, MW \quad U_{rM} = 6 \, kV \quad \cos \varphi_{rM} = 0,7 \quad I_{LR}/I_{RM} = 5$$

jmenovitý zdánlivý příkon motoru:

$$S_{rM} = \frac{P_{rM}}{\cos \varphi_{rM}} = \frac{3}{0,7} = 4,286 \, MVA$$

impedance motoru (absolutní hodnota):

$$Z_M = \frac{1}{I_{LR}/I_{RM}} \cdot \frac{U_{rM}}{\sqrt{3} \cdot I_{rM}} = \frac{1}{I_{LR}/I_{RM}} \cdot \frac{U_{rM}^2}{S_{rM}} = \frac{1}{5} \cdot \frac{6^2 \, kV}{4,286 \, MVA} = 1,680 \, \Omega$$

reaktance motoru:

$$R_M/X_M = 0,1 \quad (\text{motory VN o výkonu } P_{rM} \geq 1 \, MW \text{ na dvojici pólů})$$

$$X_M = \frac{Z_M}{\sqrt{1 + \left(\frac{R_M}{X_M}\right)^2}} = \frac{1,680}{\sqrt{1 + 0,1^2}} = 1,672 \, \Omega$$

rezistance motoru:

$$R_M = \sqrt{Z_M^2 - X_M^2} = \sqrt{1,680^2 - 1,672^2} = 0,164 \, \Omega$$

impedance motoru:

$$\underline{Z}_M = \underline{0,164 + j1,672 \Omega = 1,680 \angle 84,40^\circ \Omega}$$

Vedení V1: $l_1 = 25 \text{ km}$ $R_{V1} = 0,15 \Omega \text{ km}^{-1}$ $X_{V1} = 0,4 \Omega \text{ km}^{-1}$

Impedance vedení:

$$\underline{Z}_{L1} = l_1 \cdot (R_{V1} + jX_{V1})$$

$$\underline{Z}_{L1} = 25 \cdot (0,15 + j0,4)$$

$$\underline{Z}_{L1} = \underline{3,75 + j10 \Omega}$$

Vedení V2: $l_2 = 18 \text{ km}$ $R_{V2} = 0,2 \Omega \text{ km}^{-1}$ $X_{V2} = 0,41 \Omega \text{ km}^{-1}$

$$\underline{Z}_{L2} = \underline{3,6 + j7,38 \Omega}$$

Vedení V3: $l_3 = 60 \text{ km}$ $R_{V3} = 0,2 \Omega \text{ km}^{-1}$ $X_{V3} = 0,42 \Omega \text{ km}^{-1}$

$$\underline{Z}_{L3} = \underline{12 + j25,2 \Omega}$$

Vedení V4: $l_4 = 9 \text{ km}$ $R_{V4} = 0,15 \Omega \text{ km}^{-1}$ $X_{V4} = 0,41 \Omega \text{ km}^{-1}$

$$\underline{Z}_{L4} = \underline{1,35 + j3,69 \Omega}$$

Vedení V5: $l_5 = 30 \text{ km}$ $R_{V5} = 0,13 \Omega \text{ km}^{-1}$ $X_{V5} = 0,4 \Omega \text{ km}^{-1}$

$$\underline{Z}_{L5} = \underline{3,9 + j12 \Omega}$$

Náhradní schéma zkratového obvodu – sousledná a zpětná impedance – místo zkratu „A“:

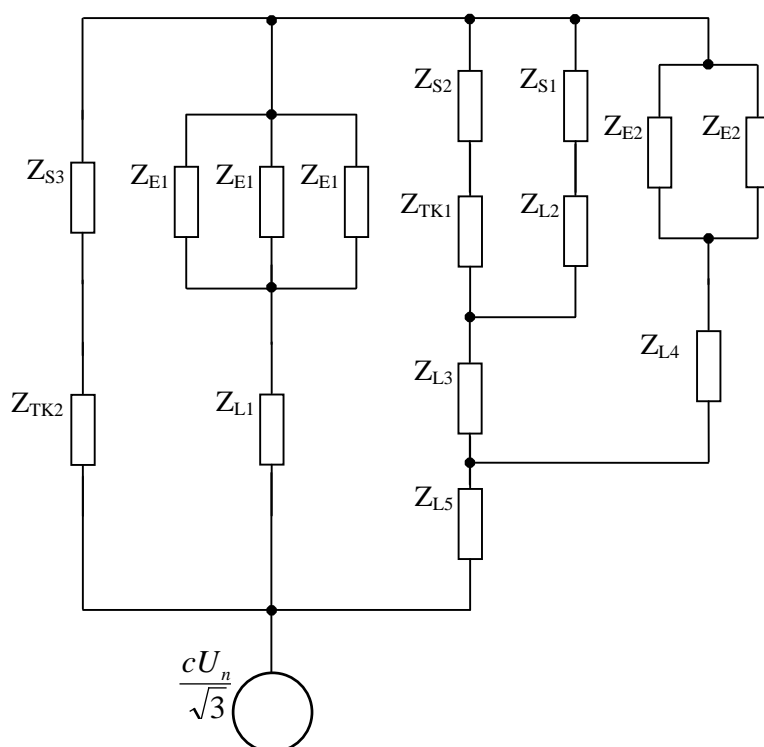
Pro místo zkratu „A“ lze zanedbat příspěvek asynchronních motorů M1, M2, M3, pokud je splněna podmínka:

$$\frac{\sum P_{rM}}{\sum S_{rT}} \leq \frac{0,8}{\left| \frac{c \cdot 100 \sum S_{rT}}{\sqrt{3} \cdot U_{nA} \cdot I_{kA}''} - 0,3 \right|}$$

$$\frac{3 \cdot 3 \text{ MW}}{2 \cdot 10 \text{ MVA}} \leq \frac{0,8}{\left| \frac{1,1 \cdot 100 \cdot (2 \cdot 10 \text{ MVA})}{\sqrt{3} \cdot 110 \cdot 26,263} - 0,3 \right|}$$

$$\underline{0,45 \leq 5,728}$$

Podmínka je splněna, můžeme tedy zanedbat příspěvek asynchronních motorů M1, M2, M3 při výpočtu zkratových proudů v místě zkratu „A“.



Elektrárna EL1:

$$\frac{1}{\underline{Z}_{EL1}} = \frac{1}{\underline{Z}_{E1}} + \frac{1}{\underline{Z}_{E1}} + \frac{1}{\underline{Z}_{E1}} = \frac{3}{\underline{Z}_{E1}} = \frac{3\angle 0^\circ}{43,757\angle 85,28^\circ} = 0,069\angle -85,28^\circ$$

$$\underline{Z}_{EL1} = 14,586\angle 85,28^\circ \Omega = 1,2 + j14,537 \Omega$$

Elektrárna EL2:

$$\underline{Z}_{EL2} = \frac{\underline{Z}_{E2}}{2} = \frac{67,891\angle 82,39^\circ}{2} = 33,946\angle 82,39^\circ \Omega = 4,495 + j33,647 \Omega$$

Sít' S3 + transformátor T2:

$$\underline{Z}_A = \underline{Z}_{S3} + \underline{Z}_{TK2} = j1,397 + 0,116 + j6,096 = 0,116 + j7,493 \Omega = 7,494\angle 89,11^\circ \Omega$$

Elektrárna EL1 + vedení V1:

$$\underline{Z}_B = \underline{Z}_{EL1} + \underline{Z}_{L1} = 1,2 + j14,537 + 3,75 + j10 = 4,95 + j24,537 \Omega = 25,031\angle 78,59^\circ \Omega$$

Sít' S2 + transformátor T1, sít' S1 + vedení V2, vedení V3:

$$\underline{Z}_{C1} = \frac{(\underline{Z}_{S2} + \underline{Z}_{TK1}) \cdot (\underline{Z}_{S1} + \underline{Z}_{L2})}{(\underline{Z}_{S2} + \underline{Z}_{TK1}) + (\underline{Z}_{S1} + \underline{Z}_{L2})} + \underline{Z}_{L3}$$

$$\underline{Z}_{C1} = \frac{(j0,663 + 0,604 + j2,924) \cdot (j6,653 + 3,6 + j7,38)}{(j0,663 + 0,604 + j2,924) + (j6,653 + 3,6 + j7,38)} + 12 + j25,2$$

$$\underline{Z}_{C1} = 12,532 + j28,06 \Omega = 30,731\angle 65,93^\circ \Omega$$

Elektrárna EL2 + vedení V4:

$$\underline{Z}_{C2} = \underline{Z}_{EL2} + \underline{Z}_{L4} = 4,495 + j33,647 + 1,35 + j3,69$$

$$\underline{Z}_{C2} = 5,845 + j37,337 \Omega = 37,792\angle 81,1^\circ \Omega$$

Síť S2 + transformátor T1, síť S1 + vedení V2, vedení V3, elektrárna EL2 + vedení V4, vedení V5:

$$\underline{Z}_C = \frac{\underline{Z}_{C1} \cdot \underline{Z}_{C2}}{\underline{Z}_{C1} + \underline{Z}_{C2}} + \underline{Z}_{L5} = \frac{30,731 \angle 65,93^\circ \cdot 37,792 \angle 81,1^\circ}{12,532 + j28,06 + 5,845 + j37,337} + 3,9 + j12$$

$$\underline{Z}_C = 8,976 + j28,326 \, \Omega = 29,714 \angle 72,418^\circ \, \Omega$$

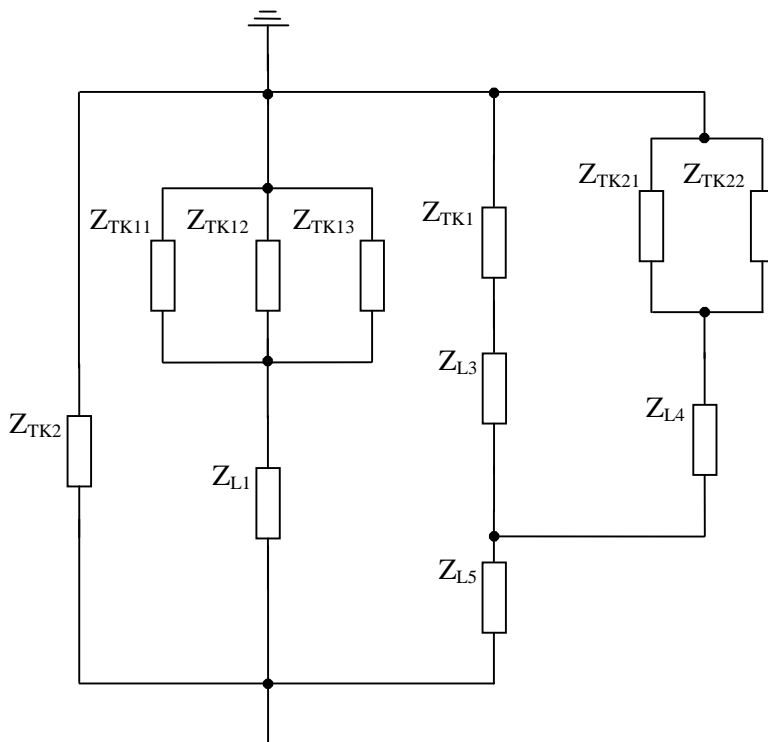
Celková impedance zkratového obvodu:

$$\frac{1}{\underline{Z}_{(1)}} = \frac{1}{\underline{Z}_A} + \frac{1}{\underline{Z}_B} + \frac{1}{\underline{Z}_C} = \frac{1}{7,494 \angle 89,11^\circ} + \frac{1}{25,031 \angle 78,59^\circ} + \frac{1}{29,714 \angle 72,418^\circ}$$

$$\frac{1}{\underline{Z}_{(1)}} = 0,376 \angle -76,15^\circ$$

$$\underline{Z}_{(1)} = 4,878 \angle 84,40^\circ \, \Omega = 0,476 + j4,855 \, \Omega$$

Náhradní schéma zkratového obvodu – netočivá impedance – místo zkratu „A“:



Transformátory T11, T12, T13:

$$\frac{1}{\underline{Z}_{TE1}} = \frac{1}{\underline{Z}_{TK11}} + \frac{1}{\underline{Z}_{TK12}} + \frac{1}{\underline{Z}_{TK13}} = \frac{3}{\underline{Z}_{TK11}} = \frac{3 \angle 0^\circ}{18,653 \angle 84,34^\circ} = 0,161 \angle -84,34^\circ$$

$$\underline{Z}_{TE1} = 6,211 \angle 84,34^\circ \, \Omega = 0,613 + j6,181 \, \Omega$$

Transformátory T21, T22:

$$\underline{Z}_{TE2} = \frac{\underline{Z}_{TK21}}{2} = \frac{24,15 \angle 76,45^\circ}{2} = 12,075 \angle 76,45^\circ \, \Omega = 2,829 + j11,739 \, \Omega$$

Transformátor T2:

$$\underline{Z}_A = \underline{Z}_{TK2} = 0,116 + j6,096 \, \Omega = 6,097 \angle 88,91^\circ \, \Omega$$

Transformátory T11, T12, T13 + vedení V1:

$$\underline{Z}_B = \underline{Z}_{L1} + \underline{Z}_{TE1} = 3,75 + j10 + 0,613 + j6,181 = 4,363 + j16,181 \Omega = 16,759 \angle 74,91^\circ \Omega$$

Transformátor T1+vedení V3, transformátory T21, T22 + vedení V4, vedení V5:

$$\underline{Z}_C = \frac{(\underline{Z}_{L3} + \underline{Z}_{TK1}) \cdot (\underline{Z}_{L4} + \underline{Z}_{TE2})}{(\underline{Z}_{L3} + \underline{Z}_{TK1}) + (\underline{Z}_{L4} + \underline{Z}_{TE2})} + \underline{Z}_{L5}$$

$$\underline{Z}_C = \frac{(12 + j25,2 + 0,604 + j2,924) \cdot (1,35 + j3,69 + 2,829 + j11,739)}{(12 + j25,2 + 0,604 + j2,924) + (1,35 + j3,69 + 2,829 + j11,739)} + 3,9 + j12$$

$$\underline{Z}_C = 7,202 + j22,025 \Omega = 23,173 \angle 71,89^\circ$$

Celková impedance zkratového obvodu:

$$\frac{1}{\underline{Z}_{(0)}} = \frac{1}{\underline{Z}_A} + \frac{1}{\underline{Z}_B} + \frac{1}{\underline{Z}_C} = \frac{1}{6,097 \angle 88,91^\circ} + \frac{1}{16,759 \angle 74,91^\circ} + \frac{1}{23,173 \angle 71,89^\circ}$$

$$\frac{1}{\underline{Z}_{(0)}} = 0,265 \angle -83,06^\circ$$

$$\underline{Z}_{(0)} = 3,774 \angle 83,06^\circ \Omega = 0,456 + j3,746 \Omega$$

Zkratové proudy – místo zkratu „A“:

Počáteční souměrný rázový zkratový proud I_k'' :

Trojfázový zkrat:
$$I_k'' = \frac{cU_n}{\sqrt{3} \cdot Z_k} = \frac{1,1 \cdot 110}{\sqrt{3} \cdot 4,878} = 14,321 \text{ kA}$$

Dvoufázový zkrat:
$$I_{k2}'' = \frac{cU_n}{|\underline{Z}_{(1)} + \underline{Z}_{(2)}|} = \frac{cU_n}{2|\underline{Z}_{(1)}|} = \frac{1,1 \cdot 110}{2 \cdot 4,878} = 12,403 \text{ kA}$$

Dvoufázový zemní zkrat:

$$I_{k2EL2}'' = cU_n \frac{|\underline{Z}_{(0)} / \underline{Z}_{(1)} - a|}{|\underline{Z}_{(1)} + 2\underline{Z}_{(0)}|} = 1,1 \cdot 110 \cdot \frac{\left| \frac{3,774 \angle 83,06^\circ}{4,878 \angle 84,40^\circ} - \frac{1}{2} - j \frac{1}{2} \sqrt{3} \right|}{|0,476 + j4,855 + 2(0,456 + j3,746)|} = 9,008 \text{ kA}$$

$$I_{k2EL3}'' = cU_n \frac{|\underline{Z}_{(0)} / \underline{Z}_{(1)} - a^2|}{|\underline{Z}_{(1)} + 2\underline{Z}_{(0)}|} = 1,1 \cdot 110 \cdot \frac{\left| \frac{3,774 \angle 83,06^\circ}{4,878 \angle 84,40^\circ} + \frac{1}{2} + j \frac{1}{2} \sqrt{3} \right|}{|0,476 + j4,855 + 2(0,456 + j3,746)|} = 14,9 \text{ kA}$$

$$I_{kE2E}'' = \frac{\sqrt{3} \cdot cU_n}{|\underline{Z}_{(1)} + 2\underline{Z}_{(0)}|} = \frac{\sqrt{3} \cdot 1,1 \cdot 110}{|0,476 + j4,855 + 2(0,456 + j3,746)|} = 16,867 \text{ kA}$$

Jednofázový zkrat:

$$I_{k1}'' = \frac{\sqrt{3} \cdot cU_n}{|2\underline{Z}_{(1)} + \underline{Z}_{(0)}|} = \frac{\sqrt{3} \cdot 1,1 \cdot 110}{|2 \cdot (0,476 + j4,855) + 0,456 + j3,746|} = 15,491 \text{ kA}$$

Nárazový zkratový proud i_p :

$$\underline{Z}_{(1)} = 0,476 + j4,855 \, \Omega \quad \Rightarrow \quad \frac{R}{X} = \frac{0,476}{4,855} = 0,098$$

$$\kappa = 1,02 + 0,98e^{-3 \frac{R}{X}} = 1,02 + 0,98e^{-3 \cdot 0,098} = 1,75$$

trojfázový zkrat: $i_p = \kappa \sqrt{2} \cdot I_k'' = 1,75 \cdot \sqrt{2} \cdot 14,321 = \underline{\underline{35,443 \, kA}}$

dvoufázový zkrat: $i_{p2} = \kappa \sqrt{2} \cdot I_{k2}'' = 1,75 \cdot \sqrt{2} \cdot 12,403 = \underline{\underline{30,696 \, kA}}$

dvoufázový zemní zkrat: $i_{p2EL2} = \kappa \sqrt{2} \cdot I_{k2EL2}'' = 1,75 \cdot \sqrt{2} \cdot 9,008 = \underline{\underline{22,294 \, kA}}$

$$i_{p2EL3} = \kappa \sqrt{2} \cdot I_{k2EL3}'' = 1,75 \cdot \sqrt{2} \cdot 14,90 = \underline{\underline{36,876 \, kA}}$$

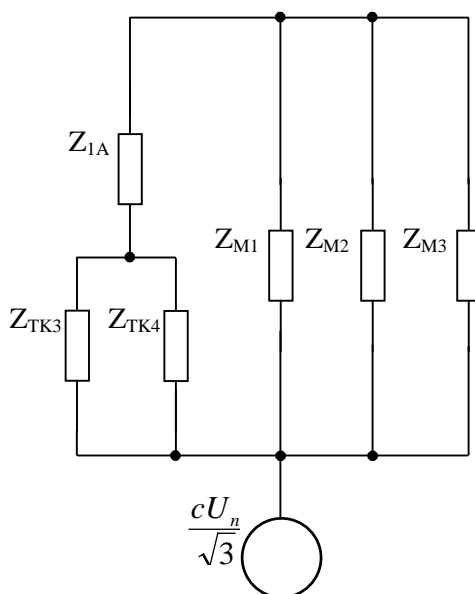
$$i_{pE2E} = \kappa \sqrt{2} \cdot I_{kE2E}'' = 1,75 \cdot \sqrt{2} \cdot 16,867 = \underline{\underline{41,744 \, kA}}$$

jednofázový zkrat: $i_{p1} = \kappa \sqrt{2} \cdot I_{k1}'' = 1,75 \cdot \sqrt{2} \cdot 15,491 = \underline{\underline{38,338 \, kA}}$

Ekvivalentní oteplovací proud I_{th} :

Pokud budeme uvažovat dobu trvání zkratu 0,5 s, můžeme uvažovat $m+n=1$ (viz Ekvivalentní oteplovací proud, str. 24). Potom pro trojfázový zkrat bude ekvivalentní oteplovací proud roven počátečnímu rázovému zkratovému proudu:

$$I_{th} = I_k'' \sqrt{m+n} = I_k'' \sqrt{1} = \underline{\underline{14,321 \, kA}}$$

Náhradní schéma zkratového obvodu – sousledná a zpětná impedance – místo zkratu „B“:**Transformátory T3, T4:**

$$\underline{Z}_{T3,4} = \frac{\underline{Z}_{T3}}{2} = \frac{0,321 \angle 81,77^\circ}{2} = 0,161 \angle 81,77^\circ \, \Omega = 0,023 + j0,159 \, \Omega$$

Transformátory T3, T4 + impedance sítě pro zkrat v místě „A“:

$$\underline{Z}_{T3,4+1A} = \underline{Z}_{T3,4} + \underline{Z}_{1A} = 0,023 + j0,159 + 0,476 + j4,855$$

$$\underline{Z}_{T3,4+1A} = 0,499 + j5,014 \, \Omega = 5,039 \angle 84,32^\circ \, \Omega$$

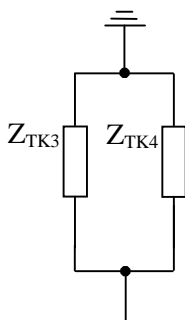
Celková impedance zkratového obvodu:

$$\frac{1}{\underline{Z}_{(1)}} = \frac{1}{\underline{Z}_{T3,4+1A}} + \frac{1}{\underline{Z}_{M1}} + \frac{1}{\underline{Z}_{M2}} + \frac{1}{\underline{Z}_{M3}} = \frac{1}{5,039 \angle 84,32^\circ} + \frac{3}{1,680 \angle 84,40^\circ}$$

$$\frac{1}{\underline{Z}_{(1)}} = 1,984 \angle -84,39^\circ$$

$$\underline{Z}_{(1)} = \underline{0,504 \angle 84,39^\circ \Omega} = \underline{0,049 + j0,501 \Omega}$$

Náhradní schéma zkratového obvodu – netočivá impedance – místo zkratu „B“:



Celková impedance zkratového obvodu:

$$\underline{Z}_{(0)} = \frac{\underline{Z}_{T3}}{2} = \frac{0,321 \angle 81,77^\circ}{2}$$

$$\underline{Z}_{(0)} = \underline{0,161 \angle 81,77^\circ \Omega} = \underline{0,023 + j0,159 \Omega}$$

Zkratové proudy – místo zkratu „B“:

Počáteční souměrný rázový zkratový proud I_k'' :

Trojfázový zkrat:
$$I_k'' = \frac{cU_n}{\sqrt{3} \cdot Z_k} = \frac{1,1 \cdot 6}{\sqrt{3} \cdot 0,504} = \underline{\underline{7,561 \text{ kA}}}$$

Dvoufázový zkrat:
$$I_{k2}'' = \frac{cU_n}{|\underline{Z}_{(1)} + \underline{Z}_{(2)}|} = \frac{cU_n}{2|\underline{Z}_{(1)}|} = \frac{1,1 \cdot 6}{2 \cdot 0,504} = \underline{\underline{6,548 \text{ kA}}}$$

Dvoufázový zemní zkrat:

$$I_{k2EL2}'' = cU_n \frac{|\underline{Z}_{(0)} / \underline{Z}_{(1)} - a|}{|\underline{Z}_{(1)} + 2\underline{Z}_{(0)}|} = 1,1 \cdot 6 \cdot \frac{\left| \frac{0,161 \angle 81,77^\circ}{0,504 \angle 84,39^\circ} - \frac{1}{2} - j\frac{1}{2}\sqrt{3} \right|}{|0,049 + j0,501 + 2(0,023 + j0,159)|} = \underline{\underline{7,201 \text{ kA}}}$$

$$I_{k2EL3}'' = cU_n \frac{|\underline{Z}_{(0)} / \underline{Z}_{(1)} - a^2|}{|\underline{Z}_{(1)} + 2\underline{Z}_{(0)}|} = 1,1 \cdot 6 \cdot \frac{\left| \frac{0,161 \angle 81,77^\circ}{0,504 \angle 84,39^\circ} + \frac{1}{2} + j\frac{1}{2}\sqrt{3} \right|}{|0,049 + j0,501 + 2(0,023 + j0,159)|} = \underline{\underline{9,459 \text{ kA}}}$$

$$I_{kE2E}'' = \frac{\sqrt{3} \cdot cU_n}{|\underline{Z}_{(1)} + 2\underline{Z}_{(0)}|} = \frac{\sqrt{3} \cdot 1,1 \cdot 6}{|0,049 + j0,501 + 2(0,023 + j0,159)|} = \underline{\underline{13,873 \text{ kA}}}$$

Jednofázový zkrat:

$$I_{k1}'' = \frac{\sqrt{3} \cdot cU_n}{|2\underline{Z}_{(1)} + \underline{Z}_{(0)}|} = \frac{\sqrt{3} \cdot 1,1 \cdot 6}{|2 \cdot (0,049 + j0,501) + 0,023 + j0,159|} = \underline{\underline{9,796 \text{ kA}}}$$

Nárazový zkratový proud i_p :

$$\underline{Z}_{(1)} = 0,049 + j0,501 \, \Omega \quad \Rightarrow \quad \frac{R}{X} = \frac{0,049}{0,501} = 0,098$$

$$\kappa = 1,02 + 0,98e^{-3 \frac{R}{X}} = 1,02 + 0,98e^{-3 \cdot 0,098} = 1,75$$

$$\text{trojfázový zkrat:} \quad i_p = \kappa \sqrt{2} \cdot I_k'' = 1,75 \cdot \sqrt{2} \cdot 7,561 = \underline{\underline{18,713 \, kA}}$$

$$\text{dvoufázový zkrat:} \quad i_{p2} = \kappa \sqrt{2} \cdot I_{k2}'' = 1,75 \cdot \sqrt{2} \cdot 6,548 = \underline{\underline{16,205 \, kA}}$$

$$\text{dvoufázový zemní zkrat:} \quad i_{p2EL2} = \kappa \sqrt{2} \cdot I_{k2EL2}'' = 1,75 \cdot \sqrt{2} \cdot 7,201 = \underline{\underline{17,822 \, kA}}$$

$$i_{p2EL3} = \kappa \sqrt{2} \cdot I_{k2EL3}'' = 1,75 \cdot \sqrt{2} \cdot 9,459 = \underline{\underline{23,410 \, kA}}$$

$$i_{pE2E} = \kappa \sqrt{2} \cdot I_{kE2E}'' = 1,75 \cdot \sqrt{2} \cdot 13,873 = \underline{\underline{34,334 \, kA}}$$

$$\text{jednofázový zkrat:} \quad i_{p1} = \kappa \sqrt{2} \cdot I_{k1}'' = 1,70 \cdot \sqrt{2} \cdot 9,796 = \underline{\underline{24,244 \, kA}}$$

Ekvivalentní oteplovací proud I_{th} :

Pokud budeme uvažovat dobu trvání zkratu 0,5 s, můžeme uvažovat $m+n=1$ (viz Ekvivalentní oteplovací proud, str. 24). Potom pro trojfázový zkrat bude ekvivalentní oteplovací proud roven počátečnímu rázovému zkratovému proudu:

$$I_{th} = I_k'' \sqrt{m+n} = I_k'' \sqrt{1} = \underline{\underline{7,561 \, kA}}$$

Závěr

Zkratky jsou jednou z nejvýznamnějších poruch v elektrizačních soustavách. Musíme je předpokládat a umět stanovit jejich velikost. Podle vypočtené velikosti zkratových proudů pak dimenzujeme elektrická zařízení ve zkratovém obvodu. Dynamické a tepelné účinky zkratových proudů musíme kontrolovat u přípojníc a spojů provedených holými pásy, kabelů, odpojovačů, odpínačů, vypínačů, pojistek, přístrojových transformátorů proudu, stykačů a jističů.

V kapitole Výpočet zkratových proudů uvádím u počátečního rázového zkratového proudu pro dvoufázový zemní zkrat, že proud I''_{kE2E} , který prochází zemí nebo zemnicími vodiči je největší ze všech počátečních souměrných rázových zkratových proudů I''_k , I''_{k2} , I''_{k2E} a I''_{k1} , pokud je impedance $\underline{Z}_{(0)}$ menší než $\underline{Z}_{(2)}$. V příkladu výpočtu zkratových proudů je impedance $\underline{Z}_{(0)}$ menší než $\underline{Z}_{(2)}$ pro zkrat v místě „A“ i pro zkrat v místě „B“ a proud I''_{kE2E} vyšel největší ze všech počátečních souměrných rázových zkratových proudů. V tomto případě tedy dojde k tomu že největší možný proud poteče zemnicími vodiči při dvojfázovém zkratu se zemním spojením.

Podle vypočtených zkratových proudů v příkladu bychom tedy dimenzovali přípojnice v obou rozvodnách 110 kV a 6 kV, vypínače, jističe a pojistky, přístrojové transformátory proudu apod. Pro dimenzování zařízení podle mechanického namáhání při zkratu je určující nárazový zkratový proud i_p . Pokud je jmenovitý dynamický proud elektrického přístroje větší než nárazový zkratový proud, pak přístroj odolá bez poškození silovým účinkům zkratového proudu. Dimenzování elektrických zařízení podle tepelného namáhání se provádí podle ekvivalentního oteplovacího proudu, který musí být udaný spolu s dobou trvání zkratu. Zařízení bude odolné proti tepelným účinkům zkratového proudu, pokud bude jeho jmenovitý krátkodobý proud větší než ekvivalentní oteplovací proud při daném zkratu. Toto dimenzování zde neprovádím, protože by přesahovalo rámec této bakalářské práce.

Tématem zkratových proudů a příbuznými tématy se podrobněji zabývá uvedená literatura. Avšak, protože se jedná o literaturu převážně staršího data, je odkazováno na dnes již neplatnou normu zabývající se zkratovými proudy ČSN 33 3020. Nová norma ČSN EN 60909 je rozdělena na několik částí. Část 0, ze které čerpám v této práci se zabývá výpočtem proudů, část 3 pojednává o proudech během dvou nesoumírných současných jednofázových zkratů a přispěvcích zkratových proudů tekoucích zemí. V dnešní době je také samozřejmě možné provádět výpočet zkratových proudů pomocí výpočetní techniky a k tomu určených programů. Ušetříme tak čas potřebný k ručnímu výpočtu, který může být v případě složitých sítí značně časově náročný.

Použitá literatura

- [1] ČSN EN 60909-0 Zkratové proudy v trojfázových střídavých soustavách – Část 0: Výpočet proudů. Český normalizační institut, 2002.
- [2] Pauza, J.: Zkratky v elektrických rozvodech, Praha, SNTL, 1970.
- [3] Pauza, J.: Silnoprúdová rozvodná zařízení v průmyslu, Praha, SNTL, 1974.
- [4] Krychtálek, Z. Pauza, J.: Elektrické stanice, Praha, SNTL, 1989.
- [5] Trojánek, Z., Hájek, J., Kvasnica, P.: Přechodné jevy v elektrizačních soustavách, Praha, SNTL, 1987.
- [6] Hodinka, M., Fecko, Š., Němeček, F.: Přenos a rozvod elektrické energie, Praha, SNTL 1989.
- [7] Horák, K.: Výpočet elektrických sítí, Praha, SNTL 1980.
- [8] Novotný, V., Vávra, Z.: Spínací přístroje a rozváděče na vysoké napětí, Praha, SNTL, 1986.